



核科学与工程

CSNS 多功能反射谱仪主探测器读出电子学系统研制

曾莉欣^{1,2,3}, 赵豫斌^{1,2,3}, 陈少佳^{1,2,3}, 田兴成^{1,2,3}, 于莉^{1,2,3},
骆宏^{1,2,3}, 王艳凤^{1,2,3}, 赵东旭^{1,2,3}, 孙志嘉^{1,2,3}

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 散裂中子源科学中心, 广东东莞 523803;
3. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

摘要: 为满足中国散裂中子源(CSNS)多功能反射谱仪(MR)主探测器高气压³He多丝正比室探测器(MWPC)的需求, 研制了专用的读出电子学系统。该系统主要由核心前放板和触发扇出板构成, 其中以前放板为核心, 采用了6块前放板实现探测器142路模拟信号的数字化, 并通过判选机制甄别中子信息, 将有效中子事例打包发送给后端, 触发扇出板提供同一时刻到达的T0信号和触发信号, 以确保数据的对齐。读出电子学系统分别在实验室和束流条件下, 进行了相关指标测试, 测试结果表明性能优于设计要求。目前MWPC探测器已成功安装到MR谱仪现场, 并且已经开始稳定运行。

关键词: 多功能反射谱仪; 多丝正比室探测器; 重心法; 前置放大器; 可编程逻辑阵列

中图分类号: TL99 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202133.210146

Development of readout electronics system for main detector of CSNS multi-function reflectance spectrometer

Zeng Lixin^{1,2,3}, Zhao Yubin^{1,2,3}, Chen Shaojia^{1,2,3}, Tian Xingcheng^{1,2,3}, Yu Li^{1,2,3},
Luo Hong^{1,2,3}, Wang Yanfeng^{1,2,3}, Zhao Dongxu^{1,2,3}, Sun Zhijia^{1,2,3}

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China;
3. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China)

Abstract: A special readout electronic system was developed to meet the needs of the ³He multiwire proportional chamber detector (MWPC) of multi-functional reflectance spectrometer (MR) of China Spallation Neutron Source (CSNS). The system is mainly composed of core preamplifier board and trigger fan out board. Six preamplifier boards are used to digitize 142 analog signals of the detector. The neutron information is screened through the discrimination mechanism, and the effective neutron cases are packaged and sent to the back end. The trigger fan out board provides the T0 signal and trigger signal arriving at the same time to ensure the alignment of data. The readout electronics system has been tested in laboratory and beam conditions respectively. The test results show that the performance is better than the design requirements. At present, the MWPC detector has been successfully installed in the field of MR spectrometer, and has begun to operate stably.

Key words: multi-functional reflectance spectrometer; multiwire proportional chamber detector; barycenter method; preamplifier; FPGA

中国散裂中子源(CSNS)是我国建设的首台脉冲散裂中子源, 为多个学科前沿领域的研究提供了一个功能强大的国际化科研平台^[1-5]。多功能反射谱仪(MR)是中国散裂中子源首期建设的3台谱仪之一, 是研究薄膜材料结构及磁结构的重要手段^[6]。MR由斩波器系统、导管系统、狭缝系统、极化系统、探测器系统、电子学系统和数据分析系统等多个系统组成, 其中中子探测器作为中子散射谱仪的核心部件之一, 在很大程度上决定着谱仪的分辨

* 收稿日期: 2021-04-13; 修订日期: 2021-07-28

基金项目: 核探测与核电子学国家重点实验室项目(SKLPDE-ZZ-201801); 国家自然科学基金重点项目(11635012)

作者简介: 曾莉欣(1987—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事核电子学研究。

通信作者: 孙志嘉(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事探测器研究。

能力和综合性能^[7-8]。MR 谱仪主探测器采用的是高压³He 二维多丝正比室探测器(MWPC), 其具有较高的探测效率, 低的 γ 灵敏度, 优越的位置分辨, 易于大面积制作, 工作稳定等优点^[9-10]。

传统 MWPC 探测器的信号读出方法有延迟线法、数字读出法、电荷重心法等^[11-13], 延迟线法和数字读出法虽然成本低且设计相对简单, 但数字读出法的分辨性能不如重心法, 而延迟线法在通道数多时不利于高计数率测量。因此, 为了同时满足高位置分辨和较高计数率的需求, 本文研制了基于重心法的 MWPC 读出电子学系统, 此外, 为了适应 MR 谱仪多电机工作的应用环境, 研制的电子学系统还需具备有抗干扰能力强、集成度高等特点。下面将主要介绍多功能反射谱仪主探测器读出电子学系统的设计方案以及性能测试结果。

1 系统架构

MWPC 探测器有效面积为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$, 为实现较高分辨, 采用两层相互垂直的读出条结构, 共 142 路读出通道, 其中 x 方向 50 路, y 方向 92 路。为了同时满足探测器和谱仪的需求, 研制的高性能读出电子学系统需要满足以下几个要求: (1) 高集成度, 反射谱仪现场安装空间狭小, 需将读出电子学集成安装在探测器屏蔽体内部; (2) 高精度, 单通道输入电荷量测量动态范围为 $10\sim 200\text{ fC}$, 电荷分辨率要好于 1 fC , 电荷积分非线性要求不高于 1%; (3) 高计数率, 单通道瞬时计数率不低于 $100\ 000/\text{s}$; (4) 电子学的实时响应速度快。根据这些要求, 在专用读出电子学的具体设计上利用前端模拟电路实现探测器输出微弱电信号调理放大, 同时结合 ADC+FPGA 的方案实现信号数字化以及数据的实时处理。

图 1 为电子学系统架构图, 电子学系统硬件结构主要由 24 通道核心前放板(MWPC_FEB)、触发扇出板(MWPC_TFB)、T0 控制板(CSNS_ICB)、光纤交换机和服务器组成。6 块 MWPC_FEB 前端电子学模块实现 142 路探测器模拟信号放大、波形数字化、数字寻峰算法以及触发判选等处理后, 将数据打包上传到后端服务器。同时为实现 6 个电子学前端模块的数据对齐, 设计了 MWPC_TFB 模块和 CSNS_ICB 模块, 其中 MWPC_TFB 模块实现对探测器阳极信号的放大、甄别等处理后产生触发信号, 并扇出给各个 MWPC_FEB 模块, 同时结合外部 CSNS_ICB 提供的 T0 信号, 实现最终的数据对齐。3 种硬件板均以 FPGA 处理器为核心, 通过 Sitcp 协议实现与服务器的交互, 接收服务器的配置命令, 并根据要求上传有效数据包。

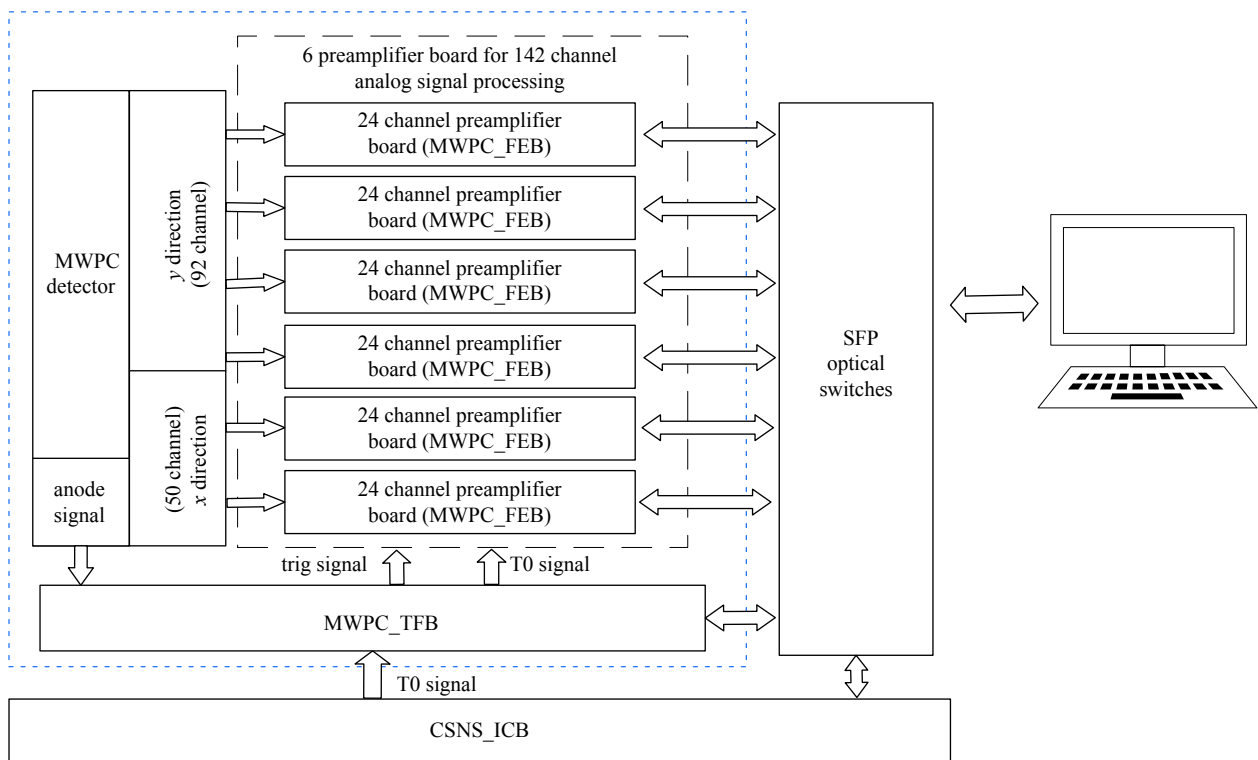


Fig. 1 Electronic system architecture

图 1 电子学系统架构图

设计的高性能读出电子学系统除了要满足探测器的需求以外, 还需考虑在反射谱仪束流环境下能够长时间正常工作, 这涉及到读出电子学系统的安装、抗干扰、运行维护等多方面的工作, 在极端情况下, 电子学屏蔽外

壳的设计、系统的接地等工作的复杂度甚至有可能超过了电子学设计本身。因此读出电子学系统还兼容了抗电磁干扰设计,将 6 块 MWPC_FEB 和 1 块 MWPC_TFB 放置在探测器特制的硼铝合金屏蔽体内,以减少 MWPC_FEB 与探测器之间的引线长度,同时采用 SAMTEC 公司生产的带屏蔽的同轴电缆进行连接,实现两端接地,以降低系统噪声。受屏蔽盒空间的影响,电路板排列极其紧凑,各电路板尺寸严格控制在高度不超过 120 mm,长度不超过 240 mm,各板相距 3~4 cm 安装,总宽度不超过 280 mm。密闭且密集的安装方式必然会导致电子学系统内部温度的急剧上升,而电子元器件长时间工作在高温下不仅会降低使用寿命甚至会出现异常,因此电子学系统屏蔽盒内部设计了专用的冷却气路装置,通过吹风冷却导热的方式来实现散热。

1.1 核心前放板

MWPC_FEB 作为整个读出电子学系统的核心,集成了前端模拟电路和后端数字电路,如图 2 所示。前端模拟电路通过信号放大、滤波成形等功能实现 24 个通道的模拟信号读出,后端数字电路采用高精度 ADC 实现模拟信号数字化,并基于 FPGA 实现中子甄别的算法,将中子击中的通道信息、电荷信息和时间信息打包发送给服务器端。

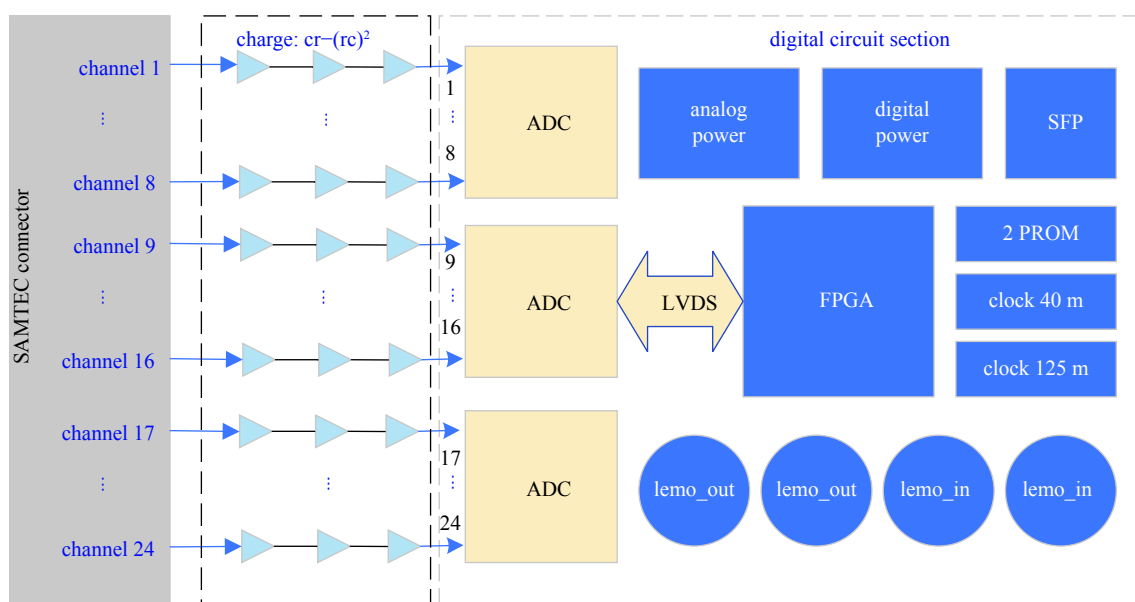


Fig. 2 Core preamplifier board

图 2 核心前放板

前端模拟电路决定了系统的电荷分辨性能。常用的前端放大电路有电流灵敏、电压灵敏和电荷灵敏 3 种,本系统采用电荷灵敏前置放大实现高分辨。为了满足 1 fC 的电荷分辨要求,经调研,选用低噪声集成运放 OPA657 作为前置放大电路的第一级。中间级电路只采用两级 RC 成形放大,将输出信号的成形宽度控制在 2.5 μ s 内,确保满足 100 000/s 高计数率的测量。最后一级放大驱动采用了 AD8137,该器件功耗较小,输出电流 20 mA,静态时,输出为零,采用单端直流耦合方式连接到 ADC。出于安全考虑,为了防止因探测器偶然性的高压打火造成前放输入电路的损坏,还设计了高压保护电路。该电路主要由 1 个电阻和 1 个二极管组成。实际保护二极管的型号为 BAV99,内部包含有正、负两个方向的双二极管,可以对打火引起的正、负两个极性的电压脉冲都起到保护作用。

根据电荷量测量的动态范围以及最小电荷分辨,要求 ADC 的有效位不低于 7 位,因此数字电路选用了 3 片高集成度的 10 位串行 AD9212 实现 24 路通道信号的采集,单个 ADC 可同时采集 8 路信号,最高采样频率可达到 65 MSPS。通过 ADC 实现信号数字化后,还需要对数字化信号进行处理和判选,以获得高的有效中子事例,前放板基于高性能 FPGA-Virtex5LX155T 实现相关逻辑设计,内部逻辑如图 3 所示。首先 FPGA 通过高速差分 LVDS 接口接收 ADC 输出的数据流,在数据对齐模块中实现串并转换。转换后的波形化数据被送入中子甄别算法模块,经过阈值判选和波形判别等分析处理,筛选出有效数据,最后对有效数据进行缓存、打包和发送。SiTCP 内核模块是实现 FPGA 与上位机网络通信的关键部分,它支持 TCP/IP 可靠传输协议,传输速率可达 1 GB/s,实现了数据的高速通信。

1.2 触发扇出板

触发扇出板硬件设计如图 4 所示,主要功能是产生一定宽度触发信号和接收 T0 信号,并同步扇出触发信号和

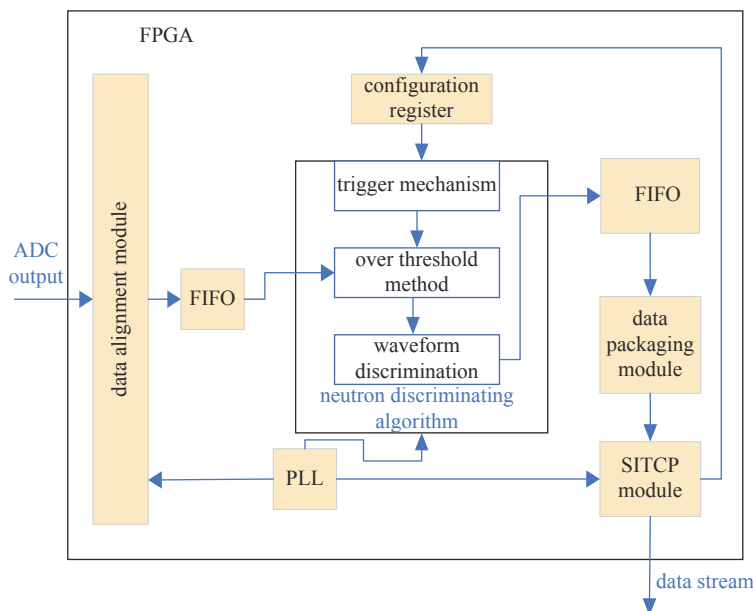


Fig. 3 FPGA internal logic

图3 FPGA 内部逻辑

T0 信号给各核心前放板。采用 Xilinx 公司的主控芯片 Virtex5LX20T 通过标准串口实现对 12 位高精度 DAC 芯片 AD5323 的控制, 输出精度高于 0.5 mV, 电压输出范围为 0~2 V。将 DAC 输出的电压值作为阈值, 与放大调理后的探测器阳极信号一同送入高速比较器 ADCMP605A, 一旦阳极信号高于 DAC 电压阈值, 就会产生一个不定脉宽的高电平信号。当阳极信号较弱时, 产生的脉冲信号宽度会小于 FPGA 的 40 M 系统时钟周期, 因此在 FPGA 逻辑设计中实现只要有高电平即产生 1 个 200 ns 固定宽度的高电平脉冲信号, 将这个信号作为触发信号, 通过驱动芯片 NB7L1008 扇出给各前放板。为了简化系统设计, 电路板还集成了 T0 信号的扇出功能, 接收控制板的 T0 信号, 实现六路 T0 信号的扇出。

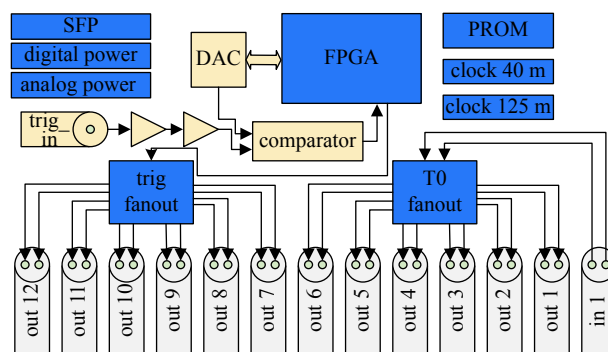


Fig. 4 Trigger fan out board

图4 触发扇出板

2 性能测试

2.1 电荷分辨

电荷分辨用于测量电子学系统的噪声水平。信号发生器提供信号给信号扇出板, 再由信号扇出板经过 1 pF 的微分电容转化成电荷信号输出给核心前放板。首先, 设置幅值 D_1 为 100 mV, 频率为 1 kHz, 占空比为 30% 的脉冲信号, 上位机获取 10 000 个 ADC 输出的波形峰值, 计算给出 10 000 个峰值的平均值 \overline{ADC}_1 和均方根值 σ_{D1} , 然后手动改变脉冲信号幅值 D_2 为 200 mV, 其他参数不变, 上位机获取 10 000 个波形峰值, 计算给出 10 000 个峰值的平均峰值 \overline{ADC}_2 和均方根值 σ_{D2} , 通过式(1)求得电荷分辨。

$$\sigma_Q = \frac{D_2 - D_1}{\overline{ADC}_2 - \overline{ADC}_1} \times \frac{\sigma_{D1} + \sigma_{D2}}{2} \quad (1)$$

依照该方法^[14]可一次求出 24 个通道的电荷分辨值, 如图 5 所示。统计所有通道的电荷分辨, 如图 6 所示, 电子学系统的电荷分辨典型值为 ~ 0.5 fC。

2.2 电荷积分非线性测试

按表 1 参数, 手动从低到高设置 16 个不同的输入信号幅值, 对每个输入值测试得到 ADC 输出的峰值, 重复测量 50 次, 统计各点平均值, 然后对各平均值作一次项最小二乘法直线拟合, 根据式(2)给出积分非线性。单次测试可求出 24 个通道的积分非线性值, 如图 7 所示。由图 8 统计得到电荷积分非线性的典型值为 $\sim 0.3\%$ 。

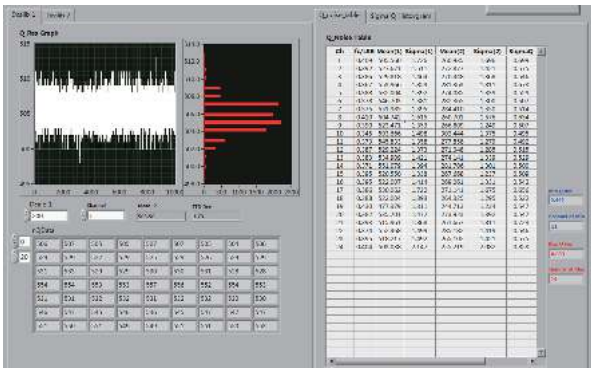


Fig. 5 Test interface of charge resolution

图 5 电荷分辨测试界面

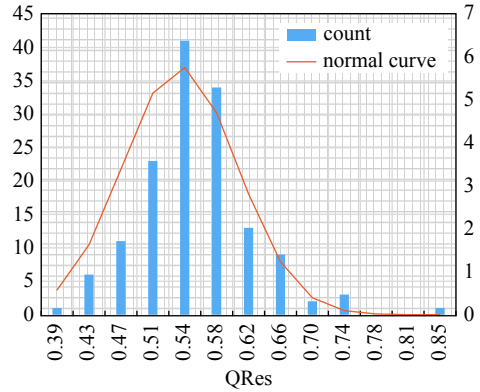


Fig. 6 Charge resolution of 142 channels

图 6 142 通道的电荷分辨

表 1 信号输入值

Table 1 Value of input signal

No.	input/mV	No.	input/mV
1	5	9	80
2	10	10	90
3	20	11	100
4	30	12	120
5	40	13	140
6	50	14	160
7	60	15	180
8	70	16	200

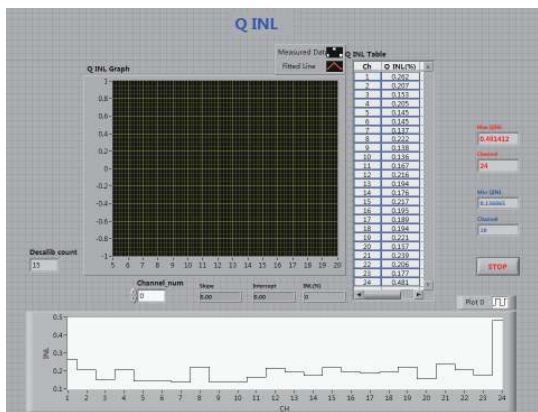


Fig. 7 Test interface of charge integration nonlinearity

图 7 电荷积分非线性测试界面

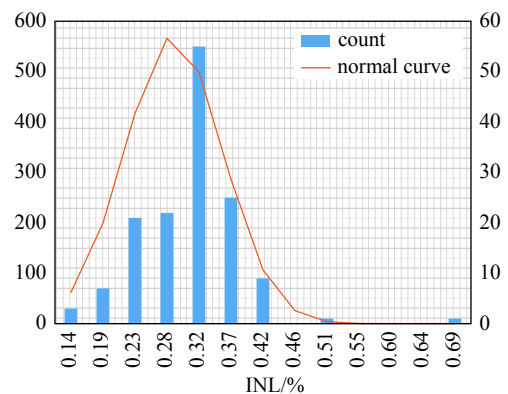


Fig. 8 Charge integration nonlinearity of 142 channels

图 8 142 通道的电荷积分非线性

$$INL = \frac{\text{实验点在y轴方向偏离拟合直线的最大绝对值}}{\text{满刻度输入对应的y值} - \text{拟合直线在y轴上的截距}} \quad (2)$$

2.3 位置测量

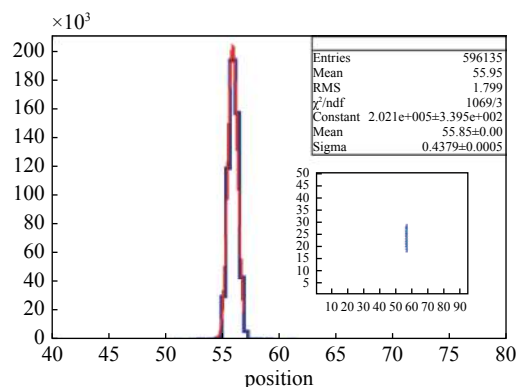
将 MWPC 探测器系统安装在 MR 散射室内的反射臂上, 探测器入射面对着中子口方向, 如图 9 所示。谱仪的狭缝系统由样品前的 3 个四刀狭缝和样品后的 1 个四刀狭缝组成, 可以控制入射中子光束的宽度、高度及分辨率^[15]。在位置测量中, 通过调节狭缝 slit2 和 slit3 的大小控制中子光斑大小, 测试系统的位置分辨。

图 10 为狭缝 $S_3/S_2=0.5/0.3$ 时, 测得的 x 方向的位置分辨, 拟合狭缝, 其 σ 值为 0.43, 位置分辨半高宽为 1.1 mm。在不同狭缝条件下, 探测器沿着水平方向摆动, 测量位置的线性度, 如图 11 所示。从图中可以看到, 不同狭缝下测试得到的光斑位置的线性度几乎一致, 而且 2 个偏差位置在 0.2 mm 拟合出的峰点位置依然能够准确识别出来。



Fig. 9 Test bench

图9 测试平台

Fig. 10 Position resolution of slit $S_3/S_2 = 0.5/0.3$ 图10 狭缝 $S_3/S_2=0.5/0.3$ 时位置分辨

2.4 最高计数率测量

在强束流的状态下,读出电子学系统前端模拟电路会出现信号堆积现象,一旦堆积严重,测量得到的电荷量偏差很大,会导致系统的整体性能下降,因此需要测量探测器系统在正常工作状态下所能够到达的最高计数率。在不同束流强度条件下,通过中子的飞行时间(time of flight, TOF)谱能否归一起来判定探测器是否处在正常工作状态。将探测器对准中子束流口,通过改变狭缝高度提高中子通量,测量中子的TOF谱如图12所示。从图12可知,当平均计数率不高于40 000/s时,此时对应的最高瞬时计数率约为平均计数率的4倍,达到了160 000/s,TOF谱形状基本归一,当平均计数率高于50 000/s时,TOF谱出现明显畸变。

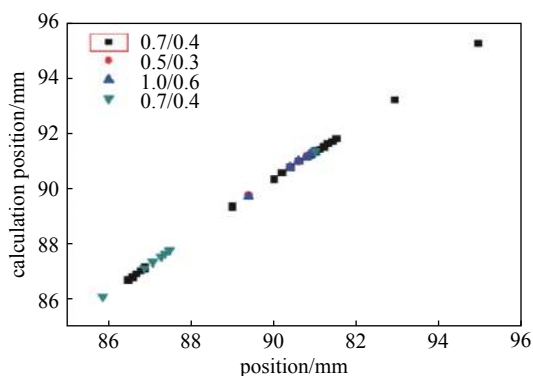


Fig. 11 Linearity of positions under different slits

图11 不同狭缝下位置的线性度

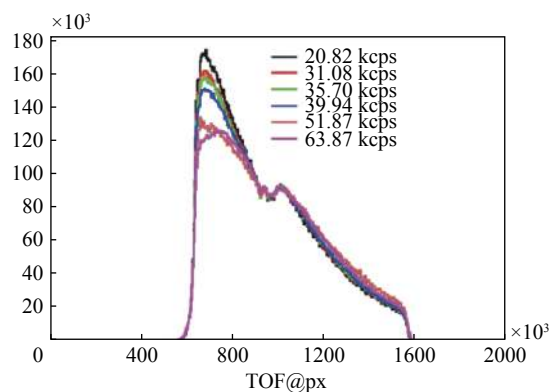


Fig. 12 TOF spectra at different slit heights

图12 不同狭缝高度下飞行时间谱

3 结论

本文介绍了用于多功能反射谱仪多丝主探测器的读出电子学系统研制,并在实验室和束流条件下分别对电荷分辨、位置分辨等关键指标进行了测试:电荷分辨达到0.5 fC,电荷积分非线性小于0.5%,位置分辨达到1.1 mm,瞬时最高计数率超过160 000/s。测试结果表明,高集成高分辨的读出电子学系统完全能够满足当前谱仪的实验需求,目前已经成功安装在多功能反射谱仪上并且得到了较好地应用,这将有利于促进我国薄膜材料分析等领域的发展。同时,针对未来中国散裂中子源打靶功率的升级,将在当前电子学系统的基础上升级更高计数率的读出电子学系统以满足未来谱仪的需求。

参考文献:

- [1] 程贺, 张玮, 王芳卫, 等. 中国散裂中子源的多学科应用[J]. 物理, 2019, 48(11): 701-707. (Cheng He, Zhang Wei, Wang Fangwei, et al. Applications of the China Spallation Neutron Source[J]. Physics, 2019, 48(11): 701-707)
- [2] 唐靖宇. 白光中子源及其多学科应用[J]. 中国基础科学, 2020, 22(4): 22-31. (Tang Jingyu. White neutron sources and multidisciplinary applications[J]. China Basic Science, 2020, 22(4): 22-31)
- [3] 王勋, 张凤祁, 陈伟, 等. 基于中国散裂中子源的商用静态随机存取存储器中子单粒子效应实验研究[J]. 物理学报, 2020, 69: 162901. (Wang Xun, Zhang Fengqi, Chen Wei, et al. Experimental study on neutron single event effects of commercial SRAMs based on CSNS[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69: 162901)

- [4] 盛洁明, 童欣, 吴留锁. 非弹性中子散射在稀土钙钛矿研究中的应用[J]. *物理*, 2019, 48(12): 800-807. (Sheng Jieming, Tong Xin, Wu Liusuo. Investigation of the spin dynamics in rare-earth perovskites by inelastic neutron scattering[J]. *Physics*, 2019, 48(12): 800-807)
- [5] 穆奇丽, 周路平, 敬罕涛, 等. CSNS简化实验缪子源的靶区物理研究[J]. *核技术*, 2019, 42: 120502. (Mu Qili, Zhou Luping, Jing Hantao, et al. Physical study on target area of simplified experimental muon source at CSNS[J]. *Nuclear Techniques*, 2019, 42: 120502)
- [6] Zhu Tao. The study of perpendicular magnetic anisotropy in the magnetic sensors with linear sensitivity using polarized neutron reflectometry[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 711: 012004.
- [7] 陈少佳, 赵豫斌, 曾莉欣, 等. CSNS工程GPPD谱仪主探测器读出电子学的研制[J]. *核技术*, 2019, 42: 060402. (Chen Shaojia, Zhao Yubin, Zeng Lixin, et al. The development of the main detector's readout electronics for GPPD of CSNS project[J]. *Nuclear Techniques*, 2019, 42: 060402)
- [8] 周建荣. 二维位置灵敏GEM中子探测器研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020. (Zhou Jianrong. Study on the two-dimensional position sensitive GEM neutron detector[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020)
- [9] 温志文. 用于CSNS的8.5atm二维多丝室探测器研制[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. (Wen Zhiwen. Development of the 8.5atm 2D multi-wire proportional chamber for CSNS[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018)
- [10] 刘凌, 祁辉荣, 代洪亮, 等. 散裂中子源高压二维位置灵敏³He探测器的实验研究[J]. *原子核物理评论*, 2019, 36(3): 351-356. (Liu Ling, Qi Huirong, Dai Hongliang, et al. Experimental study on two-dimensional position sensitive detector filled with helium-3 for the China Spallation Neutron Source[J]. *Nuclear Physics Review*, 2019, 36(3): 351-356)
- [11] 魏阳东, 邱琳, 李嘉辉, 等. 基于数字化仪及延迟线读出的涂硼多丝正比室研究[J]. *西南科技大学学报*, 2020, 35(4): 82-86. (Wei Yangdong, Qiu Lin, Li Jiahui, et al. Study of a boron-coated MWPC based on digitizer and delay line readout[J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2020, 35(4): 82-86)
- [12] 于莉. 位置灵敏中子探测实验中的大规模信号读出方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018. (Yu Li. Large scale signal readout method for position sensitive neutron detection experiments[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018)
- [13] 任海龙, 赵豫斌, 文双春, 等. CSNS多丝正比室读出电子学[J]. *核技术*, 2015, 38: 050402. (Ren Hailong, Zhao Yubin, Wen Shuangchun, et al. Electronic readout system for MWPC detector used in CSNS[J]. *Nuclear Techniques*, 2015, 38: 050402)
- [14] 邹敏, 卢云鹏, 赵豫斌, 等. 中国散裂中子源³He管电子学读出系统研制[J]. *核电子学与探测技术*, 2011, 31(10): 1077-1081. (Zou Min, Lu Yunpeng, Zhao Yubin, et al. The design of the ³He readout system on CSNS[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2011, 31(10): 1077-1081)
- [15] 詹晓芝, 肖松文, 吴岩延, 等. 多功能中子反射谱仪[J]. *现代物理知识*, 2016, 28(1): 23-27. (Zhan Xiaozhi, Xiao Songwen, Wu Yanyan, et al. Multifunctional neutron reflection spectrometer[J]. *Modern Physics*, 2016, 28(1): 23-27)