

文章编号: 1007-4627(2011)04-0464-05

基于 PXI 总线的阵列探测器数据获取系统*

鲁皖^{1,2}, 陈志强^{1, #}, 孔洁^{1,2}, 孙志宇¹, 杜成名^{1,2}, 肖国青¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 描述了一种适用于阵列探测器的数据获取系统。系统基于 PXI 总线, 采用标准 NIM 插件作为前端电子学。系统软件采用 C/C++ 语言编写, 在线分析通过调用 ROOT 类库实现, 系统运行在 Linux 操作系统下。多次测试结果表明, 系统稳定可靠, 单个 ADC 通道可以处理的最大事例率为 40 kHz。

关键词: 数据获取; 阵列探测器; PXI; ROOT

中图分类号: TP319

文献标志码: A

1 引言

随着核物理实验技术的发展, 特别是一些高亮度束流线的建成^[1], 实验中需要处理的数据率也越来越大。但是目前在核物理实验中, 大部分仍然使用基于 CAMAC 总线的数据获取系统。近年来, 利用中国科学院近代物理研究所束流进行物理实验的用户越来越多, 数据获取系统如果采用总线带宽更大的 PXI 总线, 可以提高获取系统的最大数据率, 充分利用高亮度的束流, 节省宝贵的束流时间。

PXI(PCI eXtensions for Instrumentation)总线是一种基于 PCI 总线的高速、通用的仪器总线, 提供多种触发、同步和系统时钟等信号, 与 PCI 总线相比提高了可靠性和耐用性, 降低了信号噪声。基于 PXI 总线的控制系统已经在工业控制、医学成像以及科学研究等方面获得了广泛的应用。例如, 中国科学院近代物理研究所的浅层肿瘤临床治疗试验研究中所使用的束流诊断安全控制系统, 基于 PXI 系统及 LabVIEW 软件, 为重离子治癌试验研究的顺利进行提供了可靠的保证^[2]。CAMAC 总线的工作频率仅为 1 MHz, 数据宽度为 24 bit, 最大数据传输速率 3 MB/s^[3]。与 CAMAC 数据获取系统相比, PXI 总线的工作频率为 33 MHz, 在 32 bit 的数据宽度下传输速率可以达到 132 MB/s, 同时体积

更小。

本文介绍了一种基于 PXI 总线的适用于阵列探测器的数据获取系统, 对系统性能进行了测试, 并分析了可能影响系统性能的因素。

2 系统结构

2.1 硬件结构

系统的硬件结构由 NIM 电子学、PXI 数字采集卡和机箱以及计算机和磁盘阵列组成(图 1)。NIM 电子学插件安装在一个标准 NIM 机箱中, 负责对探测器信号进行处理。PXI 数据采集卡 NI PXI-6133 安装在一个具有 5 个槽位的 NI PXI-1033 机箱中, 通过 NI PCIe-8361 机箱控制器与计算机相连。数字采集卡 NI PXI-6133 具有 8 个可以并行工作的 ADC 通道, 最大采样速率为 3 MS/s, 板载数据缓存为 32 MB。利用连接在实验室内部的容量为 12 TB 的高速磁盘阵列保存实验数据。

探测器的输出信号经过电荷灵敏前置放大器 ORTEC 142A 放大后, 送入到 16 通道线性主放大器 CAEN N568 中对信号进一步放大, 经过一个由中国科学院近代物理研究所研制的门积分电路^[4]后送入采集卡的模拟输入通道中; N568 的 fastout 信

* 收稿日期: 2011-04-29; 修改日期: 2011-06-01

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11075189); 中国科学院百人计划资助项目(0910020BR0, Y010110BR0)

作者简介: 鲁皖(1985—), 男, 安徽五河人, 硕士研究生, 从事实验核物理研究; E-mail: luwan@impcas.ac.cn

通讯联系人: 陈志强, E-mail: zqchen@impcas.ac.cn

号经过恒分甄别器 CF8000 甄别产生 NIM 逻辑信号，再送入到 ORTEC CO4020 选择相应的多重性组合，产生一个 TTL 逻辑信号作为采集卡的触发信号。数字采集卡在对电子学信号进行模数转化后，将转换后的数据先暂时存储在板载缓存上，即进行下一次模数转换，计算机等缓存上累积一定量的数据后读取，提高了计算机与采集卡之间的数据传输效率，减少了系统死时间。PXI 机箱通过机箱控制器 NI PCIe-8361 与获取计算机连接，接收获取的数据，保存在磁盘阵列上。

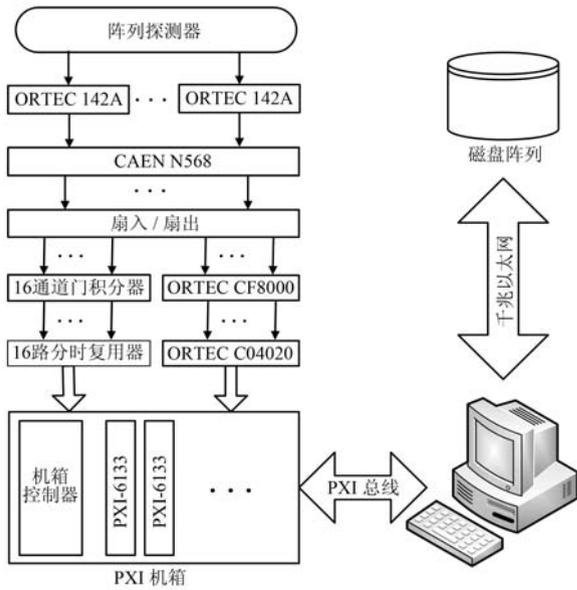


图 1 获取系统硬件结构图

门积分电路由门积分器、分时复用电路 (MUX) 和触发单元 (CF8000 和 CO4020) 组成。门积分器将主放大器中的信号再次放大，并将信号幅度保持一段时间 (约 $20 \mu s$)，然后由分时复用电路将这些信号序列化，并输出到采集卡中。此时触发单元根据分时复用电路的时序输出相应的触发信号，以使采集卡能够依次读取分时复用电路中的信号 (解复用)。门积分电路的详细描述见文献 [4]。

2.2 软件结构

数据获取软件使用 C++ 语言编写，由 g++ 编译后，运行于 Mandriva Linux 2008.1 操作系统上。基于 ROOT [5] 编写的图形界面 (GUI) 提供了简单直观的操作环境。获取系统的软件由主线程、数据采集线程和在线分析线程组成。主线程控制系统的整体流程，并协调数据采集线程和在线分析线程的协

同工作。数据采集线程设置采集卡的参数，控制采集卡获取数据，并将一部分数据传输到共享内存中。在线分析线程读取共享内存中的数据，调用 ROOT 类库，绘制出直方图。

ROOT 是在核物理实验数据分析中广泛使用的一种面向对象的 C++ 数据分析工具。与数据分析软件 PAW [6] 相比，ROOT 的命令解释器 CINT 使用类似 C++ 的语法，使用更为方便，也可以实现更为复杂的操作。通过调用 ROOT 类库，可以方便地与其他软件包结合起来编写程序。

数据采集卡的驱动程序控制采集卡的运行、参数设置，并且将 ADC 中的数据读取到计算机中。驱动程序把一个完整的数据采集过程抽象为一个称为任务 (Task) 的结构，包含了数据采集所需用的物理通道 (Channel)、系统定时、触发和同步设置、信号通路和缓存设置等信息，方便了程序的编写。

为了提高效率和稳定性，数据获取系统软件分成 3 个相互协作的独立线程：主线程、数据采集线程和在线分析线程 (图 2)。主线程负责控制系统的启动、运行和关闭，并记录下数据获取的开始时间、结束时间、数据率和数据文件大小等实验信息。用

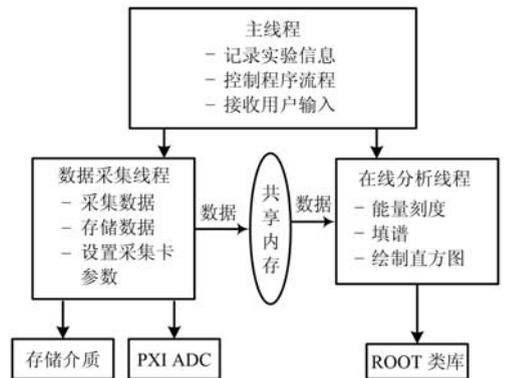


图 2 获取系统软件结构图

户输入的信息，通过主线程传递给数据采集线程和在线分析线程。数据采集线程控制采集卡的工作并读取数据，根据主线程的指令，数据将被保存到磁盘或存储在共享内存区中，并设置采集卡的参数，如信号输入范围、触发方式、触发源和缓存设置等。在线分析线程通过访问共享内存，读取数据并通过对数据进行处理和在线显示，利用 ROOT 类库，绘制一维、二维直方图，对实验数据进行快速、直观地初步分析，并对实验数据进行能量刻度、

函数拟合等处理。数据采集线程和在线分析线程之间的数据交换通过共享内存进行。为了防止共享内存中数据的读写冲突问题，在共享内存中设置了读写标志位，避免在线分析线程读取到不完整和错误的数 据。数据采集线程在向共享内存区写入数据时设置标志位；在数据写入完成时，设置标志位通知在线分析线程可以读取数据。在共享内存中，获取的实验数据按照探测器的层次结构来存储。在线分析线程每隔固定的时间间隔便读取共享内存中的数据，调用 ROOT 类库，填入到相应的直方图中，并显示更新后的直方图。

系统的数据采集和在线分析流程如图 3 所示。首先启动数据采集线程，开辟共享内存区，并且设置原始数据文件的文件名，并且初始化数字采集卡硬件，设置采集模式、触发源和缓存设置等，然后数据采集线程从采集卡板载缓存上取数，存储到原始数据文件中，并抽取一部分数据放到共享内存中。在线分析程序启动之后，读取探测器的刻度数据(如果已经刻度)，连接到共享内存区读取数据，再根据用户的设置进行分析和直方图绘制。如果设置了刻度参数，在线分析程序将对现数据进行刻度，然后进行相应分析。

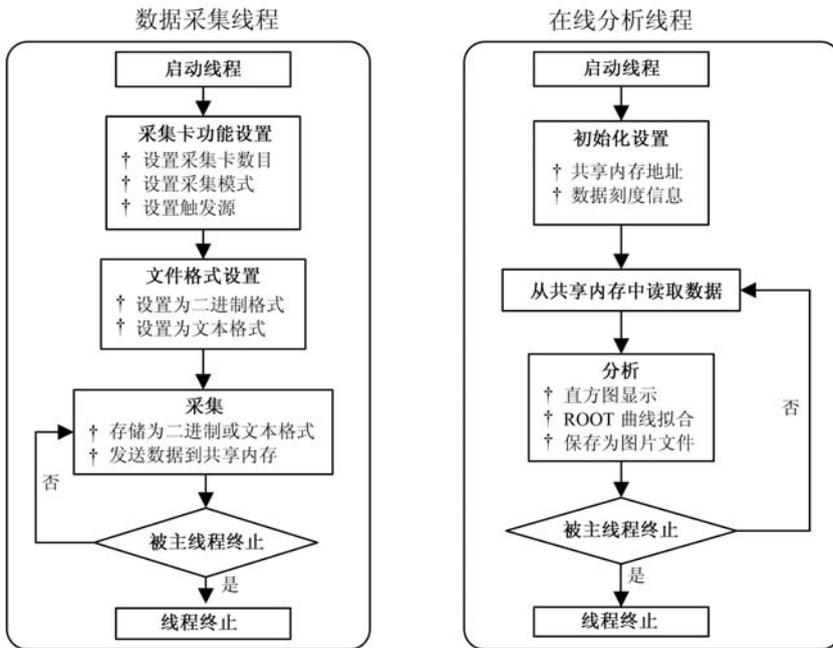


图 3 获取系统流程图

ROOT 为 GUI 提供了简单易用的工具。ROOT 中的 GUI 类通过一种称为 Signal/Slot 的消息通信机制来控制程序的行为。用户将 GUI 组件如按钮被按下、鼠标点击等动作(Signal)，与程序如绘制直方图、采集数据等行为(Slot)，通过 Connect 函数连接起来。在一个 Signal 发生后，就运行相应的 Slot。这种通信方式简化了程序的编写，提高了程序的可靠性。

系统的 GUI 利用 ROOT 的 GUI 类编写。用户通过简单的操作，可以控制系统的启动、运行和停止，设置和改变数据采集卡的参数。系统运行时，获取的实验数据的信息如获取的开始时间、数据文件的保存位置、事例率等直观地显示出来。通

过点击相应的图标，可以实时绘制出实验数据的直方图。一些简单的在线分析操作，如刻度、对感兴趣区(ROD)中的数据进行累加，也可以通过在线分析进行。

专门编写的离线分析程序读取数据采集程序保存的数据文件，并且记录下探测器的刻度参数、数据获取的开始和结束时间等信息，转换为 ROOT 格式，以供后续的实验数据分析使用。

3 测试结果与讨论

为了验证系统是否能够正常工作，我们使用上述数据获取系统测试了 CsI(Tl)闪烁体探测器和 Si 多条探测器的能谱。闪烁体探测器为中国科学院近

代物理研究所生产的尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的 CsI(Tl) 晶体, 晶体表面抛光, 使用灵敏区尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ Hamamatsu S8664-1010 雪崩性光电二极管 (APD) 进行耦合读出。晶体与 APD 表面先包覆 3 层白色 Teflon 材料, 最外层再包裹铝箔, 并将铝箔接地^[7]。圆环状 ^{137}Cs γ 源经过 $\phi 1\text{ mm}$ 孔径的准直器放置于闪烁体正前方约 10 cm 处, 测试在避光条件下的空气中进行。Si 多条探测器为一个灵敏区尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的双面 Si 多条探测器, 每一面有 40 条互相平行且条宽为 1 mm 的信号条, 两个面的信号条成 90° 垂直。三组分 α 粒子放射源放置于探测器正前方约 5 cm 处, 测试在真空中进行。测试结果(图 4)显示出了清晰

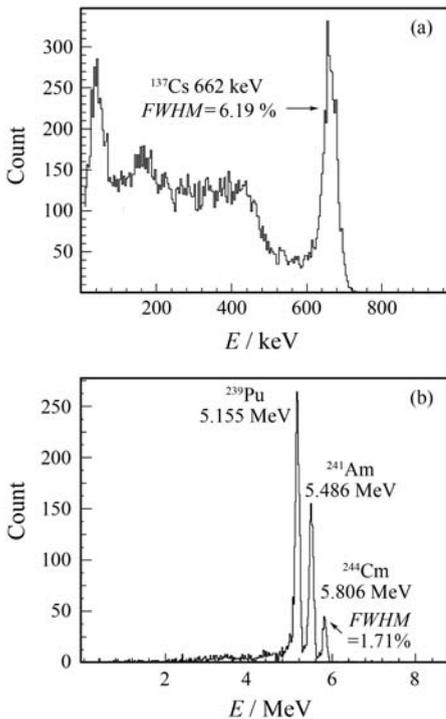


图 4 获取的探测器能谱

(a) CsI(Tl) 闪烁体探测器 ^{137}Cs 能谱, (b) Si 多条探测器三组分 α 粒子放射源能谱。

完整的谱形, 表明获取系统能够正常工作。图 4(a) 所示 CsI(Tl) 闪烁体探测器的测试结果, ^{137}Cs 能量为 662 keV 的全能峰相对能量分辨为 6.19% 。图 4(b) 所示的是 Si 多条探测器的测试结果, 可把放射源发射出的能量分别为 5.155 , 5.486 和 5.806 MeV 的 α 粒子 (^4He) 的谱线非常清楚地区分开, 相对能量分辨为 1.71% 。以上探测器在相同测试条件下通过 CAMAC 系统得到的能量分辨率基本相

同, 说明 PXI 系统电子学噪声性能达到 CAMAC 系统的水平。

死时间是数据获取系统的重要性能指标之一。由于获取系统和电子学系统在处理一个信号需要一定的时间开销(分辨时间 τ), 在这段时间内系统无法接受新的信号, 造成了数据的丢失。在死时间较小时, 获取的原始数据可以通过死时间校正来处理, 但是在系统死时间很大时, 获取的原始数据谱形可能发生改变^[8], 难以通过死时间校正来处理, 增加了实验数据的误差。图 5 显示了随着单个 ADC 通道事例率 (ER) 的增加, 上述 PXI 获取系统死时间率 (DT) 的变化情况。在单个 ADC 通道事例率小于 40 kHz 时, 系统的死时间在大部分情况下小于 2% , 显示出较好的性能。在事例率大于 40 kHz 时, 系统死时间快速上升, 主要是因为门积分器在事例率大于约 40 kHz 时工作时序被扰乱, 无法正常工作。在搭建获取系统时, 仅使用了采集卡的一个 14 bit (16384 道) ADC 通道, 由于 PXI 采集卡的每个 ADC 通道可以并行工作, 因此在系统中增加更多的采集卡后, PXI 数据获取系统的数据率仍然能够增加。

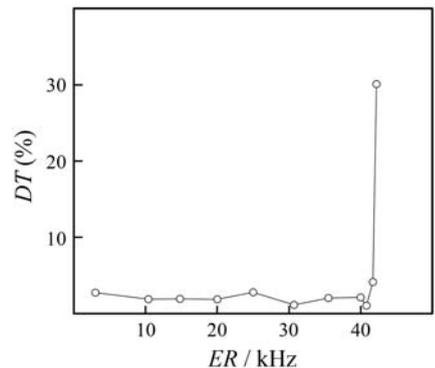


图 5 事例率与系统死时间率关系曲线

4 结论

核物理实验中阵列探测器的使用, 对获取系统提出了更高的要求。由于该系统受带宽的限制, CAMAC 系统在高计数率下具有很大的死时间。本文介绍了一种用于阵列探测器的 PXI 数据获取系统, 单个 ADC 通道在 40 kHz 事例率下死时间约占 2% , 并且比 CAMAC 系统需要更少的 ADC 数目。基于 ROOT 编写的图形界面使系统的操作简便。测试结果表明, 系统工作稳定, 性能可靠。

参考文献 (References):

- [1] Xu Hushan. Nuclear Physics Review, 2009, **26**(Suppl.): 7.
- [2] Mao Ruishi, Xiao Guoqing, Zhao Tiecheng, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2008, **20**(9): 1537 (in Chinese).
(毛瑞士, 肖国青, 赵铁成, 等. 强激光与粒子束, 2008, **20**(9): 1537.)
- [3] Xu Huagen, Sun Zhiyu, Xu Hushan, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2007, **41**(5): 343(in Chinese).
(徐华根, 孙志宇, 徐瑚珊, 等. 原子能科学与技术, 2007, **41**(5): 343.)
- [4] Kong Jie, Su Hong, Dong Chengfu, *et al.* Nuclear Electronics and Detection Technology, 2009, **29**(3): 501(in Chinese).
(孔洁, 苏弘, 董成富, 等. 核电子学与探测技术, 2009, **29**(3): 501.)
- [5] Brun R, Rademakers F. Nucl Instr and Meth, 1997, **A389**: 81.
- [6] Brun R, Couet O, Vandoni C E, *et al.* Computer Physics Communications, 1989, **57**: 432.
- [7] Yue Ke, Xu Hushan, Liang Jinjie, *et al.* Nuclear Physics Review, 2010, **27**(4): 445(in Chinese).
(岳珂, 徐瑚珊, 梁晋洁, 等. 原子核物理评论, 2010, **27**(4): 445.)
- [8] Keith H D, Loomis T C. X-Ray Spectrum, 1975, **5**: 93.

A Data Acquisition System Based on PXI Bus for Array Detectors^{*}

LU Wan^{1, 2}, CHEN Zhi-qiang^{1, #}, KONG Jie^{1, 2}, SUN Zhi-yu¹, DU Cheng-ming^{1, 2}, XIAO Guo-qing¹

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A data acquisition system for array detectors is described. The system is based on PXI bus with standard NIM modules used as front-end electronics. The system software is written in C/C++ language with its online analysis modules realized by ROOT class library. Several runs of the system under Linux show that it is reliable and is capable of handling event rates up to 40 k events/s for 1 ADC channel.

Key words: data acquisition; array detectors; PXI; ROOT

* **Received date:** 29 Apr. 2011; **Revised date:** 1 Jun. 2011

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(11075189); Hundred Talents Program of Chinese Academy of Sciences(0910020BR0, Y010110BR0)

Corresponding author: Chen Zhi-qiang, E-mail: zqchen@impcas.ac.cn