

基于 LabWindows/CVI 的空间暗物质粒子探测预研系统的数据获取软件设计

黄亚齐, 刘树彬, 封常青, 安琪

(中国科学院核探测技术与核电子学重点实验室, 物理电子学安徽省重点实验室
中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

摘要: 由中科院南京紫金山天文台领衔的空间暗物质粒子探测研究计划, 目标是在卫星平台上搭载相关探测器进行空间暗物质粒子探测研究, 目前已启动地面原理样机的研制工作。为了配合地面原理样机的调试与测试工作, 为量能器读出电子学设计了一个完备的测试控制与数据分析软件。该软件基于 LabWindows/CVI 软件开发平台, 通过 VISA 技术与电子学硬件部分通信, 同时采用动态链接库调用方法集成了 MATLAB 的相关功能, 完成了对地面原理样机 576 个电子学通道的调试和测试, 为地面原理样机的调试测试工作提供了一种有效、简便、可行的调试手段。

关键词: LabWindows/CVI; 暗物质粒子; 数据获取; MATLAB

中图分类号: TL 8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2012) 04-0407-05

对暗物质和暗能量的研究, 是当前物理学界的热点之一。目前暗物质的存在是通过天文观测所发现的, 然而标准模型中并不包括能解释暗物质的粒子。暗物质粒子探测研究很可能导致物理学产生新的变革, 因而当前世界各国都在集中人力、物力和财力研究这一问题^[1]。

为了让我国在暗物质粒子探测领域获得一席之地, 南京紫金山天文台提出开发卫星探测平台, 采用间接探测法进行卫星空间的暗物质粒子探测研究。此研究计划被列入“中国科学院空间科学先导专项”中, 并已启动地面原理样机的研制工作。

1 空间暗物质粒子探测地面原理样机

该计划的卫星平台上暗物质粒子探测器由两大部分组成: 径迹探测器及高能分辨的

BGO 量能器。其中 BGO 量能器是暗物质粒子探测器的主体, 如图 1 所示, 它一共由 12 层 BGO 晶体组成 (X、Y 方向各 6 层), 每层包括 48 块 BGO 晶体, 相邻两层分别沿 X、Y 方向排列。安装时将 24 块晶体排成一行, 两列晶体拼成一个完整平面。BGO 晶体向内的一端用反光材料包裹, 朝外的一端与光电倍增管 (PMT) 进行耦合。每个 PMT 有 3 路打拿级信号输出, 因此整个系统共需要 $12 \times 48 \times 3 = 1\,728$ 路电子学通道。

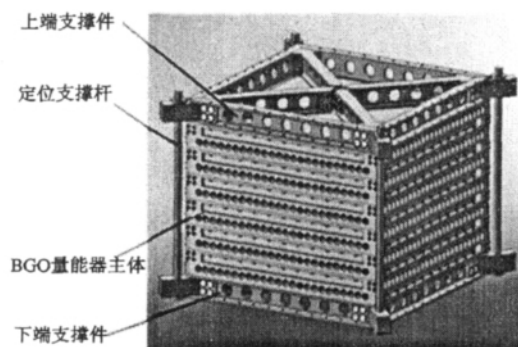


图 1 BGO 量能器结构

收稿日期: 2011-03-14

作者简介: 黄亚齐 (1987 -) 男, 硕士研究生。研究方向: 高速数据获取及分析。

整个 BGO 探测器的电子学读出功能包含三种电子学模块: 前端读出电子学模块(FEE)、数据获取子模块(Sub - DAQ)和总读出控制模块(Global - DAQ)。每块 FEE 负责每层单侧 24 只 PMT 共 72 路打拿级信号的电荷测量, 因此共需 24 块 FEE。每块 Sub - DAQ 负责汇总单个方位 6 块 FEE 的电荷测量数据, 4 块 Sub - DAQ 将测量数据上传到更上层的数据获取模块——Global - DAQ, 再由 Global - DAQ 将数据进一步汇总和格式组装, 并上传到卫星数管系统。

对于未来的星上应用, BGO 探测器的前端电子学系统须满足如下基本要求: 前端模拟电路的低噪声和大动态范围(单块 BGO 晶体有效

动态范围达到 10^6)。

地面原理样机系统是正式系统通道数的 1/3, 其 BGO 量能器仅有 4 层, 每块 BGO 晶体对应一个 PMT, 每个 PMT 有 3 路打拿级信号输出, 则共有 192 个 PMT 和 576 路电子学通道。相对应的, 其读出电子学部分需要 8 块 FEE 和 2 块 Sub - DAQ。为简化原理样机系统, 我们的设计中将其中一块 Sub - DAQ 增加逻辑实现 Global - DAQ 的功能, 汇总它本身以及另一块 Sub - DAQ 的所有数据, 然后通过 USB 总线传输到 PC 机, 因此原理样机中不存在 Global - DAQ。地面原理样机的 BGO 量能器和读出电子学部分的结构如图 2 所示。

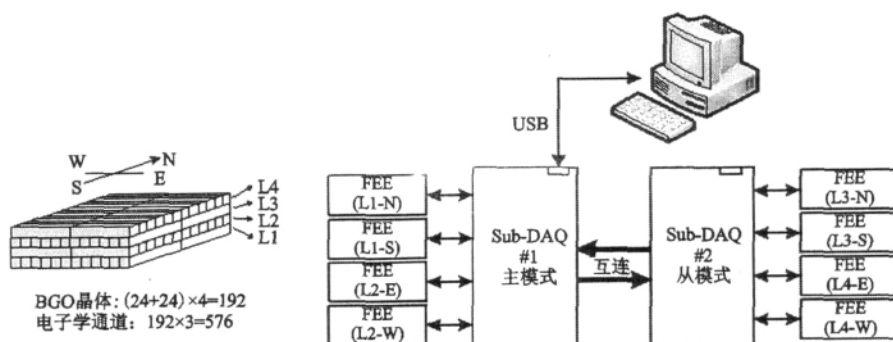


图 2 地面预研小系统 BGO 量能器及读出电子学的结构图

2 地面预研小系统的软件需求

搭建地面原理样机的目的主要是针对未来星上系统进行技术攻关, 验证其方案和关键技术的可行性。因此需要详细的电子学调试和对相关参数的测试来确保整个系统的性能达到相应指标。同时, 整个系统的多通道(576 个通道) 和大动态范围的特点意味着测试工作极其繁琐, 如果由手工完成将耗费大量的人力和时间。为了配合地面原理样机的调试与测试工作, 简化测试复杂性, 需要开发一套专门的测试软件。此软件基于 LabWindows/CVI 开发平台, 主要实现以下功能:

(1) 硬件系统配置: 包括 Sub - DAQ 的工作模式配置、对 FEE 的使能以及对自检刻度信号的 DAC 码的配置。

(2) 数据获取: 通过 USB 总线控制 Sub - DAQ 和 FEE 进行数据获取。

(3) 数据处理: 包括离线数据分析和实时

数据处理与显示。因为由电子学硬件部分上传的数据是按照自定义的数据格式进行打包之后的数据包, 所以软件内嵌了对有效数据的抽取和查找功能。

在此基础上, 此软件将配合其他测试设备完成电子学通道的自检(刻度) 测试、信号源扫描测试、台阶测试和单通道 RMS 测试以及探测器部分的光电倍增管打拿级增益测试、宇宙线测试等测试工作。

3 软件设计

LabWindows/CVI 是美国 NI (National Instruments) 公司利用虚拟仪器技术开发的 32 位面向计算机测控领域的软件开发平台, 越来越广泛地应用于各种测控仪器仪表的开发。它以 ANSIC 为核心, 将功能强大、使用灵活的 C 语言平台与用于数据采集、分析和表达的测控专业工具有机地结合起来, 提供了丰富的仪器仪表界面和控制, 并带有数值分析、数字信号处

理、GPIB、VX、VISA、TCP 等函数库。利用灵活的 C 语言,很容易实现仪器的控制、数据分析和显示^[2]。

3.1 软件的架构

本软件在 LabWindows/CVI 平台上进行开发,根据实际功能需要,采用模块化的设计思路,仔细考虑软件各个层次和各个模块之间的组合搭配。软件主要包括命令模块、状态监控模块、数据采集模块、实时显示模块以及离线分析模块,其基本结构如图 3 所示。

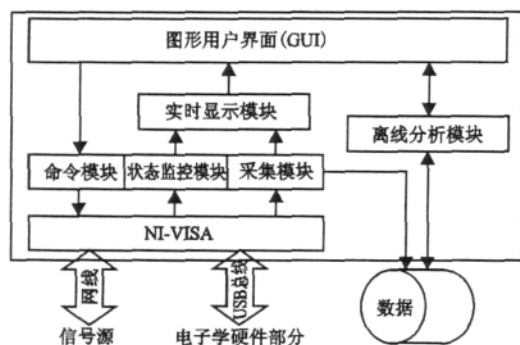


图 3 软件基本层次结构

对应于特定的调试测试工作,命令控制模块按照使用者对软件相应控件的操作向外部设备发送命令。数据采集模块负责接收保存硬件上传的数据,并在需要的情况下将数据包复制给实时显示模块进行分析、显示。状态监控模块实时反映 USB 连接状态、硬件温度等信息。已保存好的测试数据,可以交由离线分析模块进行电子学参数的分析。软件各个模块间的相互通信与配合,确保各项调试测试功能的成功实现。

3.2 软件功能的具体实现

3.2.1 硬件接口

在数据获取系统中,Sub-DAQ 通过 CY68013 USB 接口芯片与 PC 机相连,负责整个电子学硬件部分与 PC 机的通信——包括上行传输数据包和下行传输命令。数据传输方式在 CY68013 的固件中设计为批量(BULK)传输模式,采用 SLAVE FIFO 方式进行传输,保证数据传输高速可靠^[3]。同时,在信号源扫描测试中,需要由信号源产生幅度依次递增的电荷信号,为了简化测试流程,减少工作量,方便测试工作,对 Tektronix AFG3251 信号源的控制也交由软件通过网络进行控制^[4]。为了统一外部设备与软件的通信,简化软件程序设计,采用

VISA 技术解决外部设备与软件的通信问题。在软件设计中,所有与外设相关的控制与数据传输函数都采用 VISA 所提供的函数进行处理^[5]。

3.2.2 状态监控模块

软件的状态监控主要包括两个部分:对电子学硬件部分与软件连接情况的监视,对测试系统温度参数的监控。

在测试过程中,数据的传输和命令的发送都是通过 USB 接口,因此对 USB 总线接口连接状态的监控就显得尤为重要。同时,在数据采集过程中,数据的到达是随机的,因此,可能会出现较长时间没有数据到达的情况,此时就需要判断数据读取失败的原因是电子学硬件部分未获得有效数据还是 USB 接口出现断开的情况。

在软件设计中,开发了一个专门用来监控 USB 接口连接状态的线程。此进程采用主动查询 USB 端口的方式来确定电子学硬件部分的连接状态。软件与电子学硬件部分完成连接操作后,立即运行此线程,周期性地使用 VISA 库函数中提供的 viFindRsrc() 函数查找已定位的 USB 设备资源,如果 viFindRsrc() 执行失败,则认为 USB 被断开,弹出提示对话框,提示测试人员。

在硬件的设计过程中,温度参数由专门的温度感应芯片采集,与其他测试数据一起生成数据包。因此温度信息的显示需要解包和定位数据的过程,将于 3.2.4 小节详细描述。

3.2.3 命令模块

在系统的测试调试工作中,需要由软件向电子学硬件部分下发命令。命令字采用自定义的格式,每个命令字通常为 2~4 个字节。软件将命令字以 16 进制数的形式存储在 CHAR 型数组中,使用 VISA 库函数提供的 viWrite() 函数将此数据中的数据发送给电子学硬件部分。

从软件设计的模块化设计理念出发,固定格式的令程序被设计成子函数的形式,以便于提供给多处调用。

3.2.4 数据采集模块与实时显示模块

FEE 获取到的测试数据与温度数据经过 FEE 板和 Sub-DAQ 板上的 FPGA 的打包,添加了包头包尾后通过 USB 总线由软件的数据读取线程进行读取。除最后一次读取操作外,

viRead() 函数与 USB 固件相互配合,每次固定读取 512 Byte 的数据,并保存到事先设置好的数据存储位置。软件停止采集以后,剩余的数据量如果不足 512 Byte,USB 固件也将其强制上传到端口 BUFFER,供 viRead() 函数进行读取保存。

为了能够查看某测试通道的实时测试信息,软件中采用多线程的工作方式,同时开发了一个专门用于从采集到的数据包中抽取所需数据进行简单处理并显示的线程。数据采集线程与实时显示线程的协调工作原理如图 4 所示。

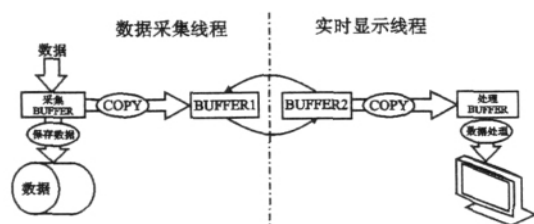


图 4 数据采集线程与实时显示线程的协调工作

数据由数据采集线程的 viRead() 函数读取到数据采集 BUFFER 后,首先被复制到数据采集线程与实时显示线程之间的数据传递 BUFFER,在此 BUFFER 装满数据之后释放对其的控制权。实时显示线程探测到数据传递 BUFFER 中的数据被更新并已装满之后,接收此 BUFFER 的管理权,并将此 BUFFER 中的数据拷贝到数据处理 BUFFER 中,并由数据处理程序进行数据包解包、有效数据定位等操作,同时释放对数据传递 BUFFER 的控制权,以使得其可以重新被数据采集线程所使用。

为了减少数据传递过程中,由于两个复制过程造成的效率损失,软件中构造了两个数据传递 BUFFER,采用乒乓模式在两个线程之间进行数据传递,使得两个线程能够高效运行,减少时间损失,提高软件对数据的传输和处理速率。

在硬件中,数据经过两次打包,形成自定义格式的数据包结构。为了得到某个通道的数据信息,实时显示线程的数据处理程序在数据处理 BUFFER 中首先定位包头信息。由于数据包格式固定,特定通道数据总是处于数据包固定的位置,查找此位置即可以得到所需要的通道数据。同时,考虑到数据处理 BUFFER 的大小并不是数据包大小的整数倍,因此可能出现

数据包分散在先后两个数据处理 BUFFER 中的情况,此时软件计算出的位置超出了 BUFFER 的容量大小。在此情况下,软件将计算得到的数据位置减去 BUFFER 的容量,即可得到数据在下面一个 BUFFER 中的位置。在此需要注意的是,温度参数在硬件设计与包尾标志一起组成包尾存储在 FEE 的数据包中。因此对温度参数在数据包中的位置也是相对固定的,对其的定位可以采用与其他通道数据相似的方式进行处理。

为了达到实时显示通道数据信息的目的,采集到的本通道数据达到确定数字(如 50)以后,由程序进行统计分析,并在数组中累加结果,最后由 PlotY() 函数将软件面板的 Graph 控件上的图像进行刷新。软件采用此种方法实现了通道数据的“准实时”显示功能。

通过上述设计,实现了数据采集保存以及三个通道的数据信息实时显示功能,显示图像如图 5 所示。

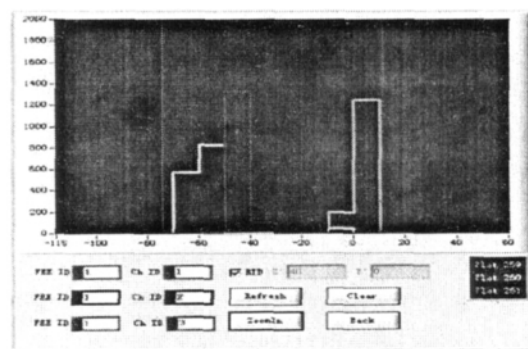


图 5 采集过程中的直方图统计实时显示

3.2.5 离线分析模块

软件集成了对实验数据的后期处理功能,可以根据实验内容和实验需要进行直方图分析、线性拟合、INL 分析等处理。

考虑到分析程序的正确性和复杂性,所有的离线分析程序都是在 MATLAB 平台下进行开发。为了让软件可以脱离 MATLAB 环境独立运行,因此未采用 LabWindows/CVI 与 MATLAB 混合编程中常用的 MATLAB 引擎调用和 Active X 服务控件接口方式。

在软件设计中, MATLAB 平台下生成的 .m 文件利用 MSVC 6.0 编译器编译生成一个 dll (Dynamically Linked Library) 文件^[6]。通过将此 dll 文件以及与其相关的 .lib 文件和 .h 文件导入 LabWindows/CVI 工程,实现对 MATLAB

数据处理功能的调用。

在软件的实际操作中,由数据处理窗口获得的相关参数经过格式转换之后形成 MATLAB 所需要的矩阵格式,采用动态链接库的方式调用 MATLAB 函数,进行数据处理、绘图等操作。图 6 为利用本软件完成的自检测试中 FEE #1 第一通道电荷量数据的线性分析结果。

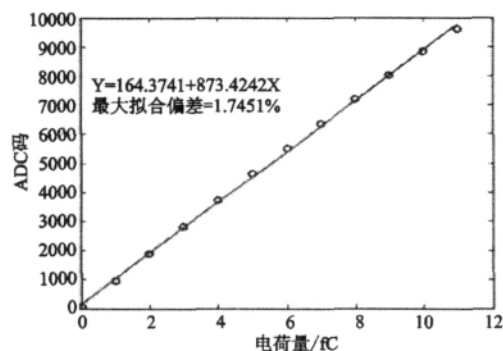


图 6 自检测试线性分析结果

4 结语

本软件主要基于 LabWindows/CVI 开发环境,开发出能够独立运行于测试PC机上的程

序。在软件设计过程中,采用了多线程的编程技术,使得软件能够高效运行。同时借助于 VISA 和 MATLAB 的相关技术,实现了数据采集、显示和数据分析功能,满足了空间暗物质粒子探测地面原理样机的调试测试需要。该软件当前已使用于预研系统的调试测试过程中,高效地推进了预研系统的搭建进程。

参考文献:

- [1]常进. 暗物质粒子探测: 意义、方法、进展及展望[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2010, 2(2): 95-99.
- [2]王建新, 杨世凤. LabWindows/CVI 测试技术及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [3]Cypress. EZ-USB Technical Reference Manual.
- [4]Tektronix. TekVISA Programmer Manual, 0711101-04, from www.tektronix.com.
- [5]National Instruments. NI-VISA Programmer Reference Manual.
- [6]何强, 何英. MATLAB 扩展编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

The Data Acquisition Software Based on LabWindows/CVI in Pre-research System of Dark Matter Particles Detection in Space

HUANG Ya - qi , LIU Shu - bin , FENG Chang - qing , AN Qi

(Key Laboratory of Technologies of Particle Detection & Electronics ,Chinese Academy of Sciences , Anhui Key Laboratory of Physical Electronics , Department of Modern Physics , University of Science and technology of China , Hefei 230026 , China)

Abstract: The project of dark matter particles detection in space led by Purple Mountain Observatory has started the development of ground-based prototype. In order to match the debugging and testing of ground-based prototype, the software for test control and data acquisition is designed, which is based on LabWindows/CVI framework and integrates the related technologies of VISA and MATLAB. Now, this software has been used in the debugging and testing of ground-based prototype, and provides an effective, simple debugging tool.

Key words: LabWindows/CVI, Dark matter particles, Data acquisition, MATLAB