

附件 2

项目编号:

密级:

国家重点研发计划课题中期 执行情况报告

项目名称: 基于惰性气体探测器的直接暗物质探测实验

课题名称: 用于暗物质探测等实验的低本底电子学
系统研发

课题负责人:(签字)_____

课题牵头单位:(盖章)_____

执行期限: 2016 年 7 月 至 2021 年 6 月

中华人民共和国科学技术部

2018 年 7 月 13 日

编 报 要 求

一、内容说明

课题中期执行情况报告着重围绕课题任务书的内容,报告课题中期重要进展情况,具体包括课题的总体目标及考核指标实现程度,人员、资金等支撑条件落实情况,课题经费使用情况等,并报告中期执行过程中的重大事项及突出进展。

二、格式要求

文字简练;报告的密级一般与任务书规定的密级相同;报告文本统一用 A4 幅面纸,文字内容一律通过“国家科技管理信息系统公共服务平台”在线填报;报告文本第一次出现外文名称时要写清全称和缩写,再出现时可以使用缩写。

三、编制程序及时间要求

项目中期总结前,由课题承担单位组织课题参与单位编制课题中期执行情况报告,经课题负责人及课题牵头单位审核后,提交项目牵头单位。

编写大纲

一、总体进展情况

1.课题中期总体进展情况

课题3包括 PandaX-III TPC 探测器大规模低本底低噪声读出电子学、以及液氩探测器光电倍增管大规模波形数字化两个研究方向。根据课题任务书，本课题的目标是完成两个方向的读出电子学关键技术攻关、以及配套读出系统的研发任务。经过两年（2016.7-2018.6）的研究，到目前为止，本课题的两个研究方向都完成了方案设计以及原型电子学的研制。

方向一的中期任务完成状态及与任务书的对照如下表：

表 1. PandaX-III 低本底低噪声读出电子学的中期完成情况

	任务书中的中期指标值	中期状态	结果
指标 1.1 读出通道数	>1000 路	1024 路	好于任务书要求
指标 1.2 电子学噪声	<10fC	<6fC	好于任务书要求
指标 1.3 积分非线性	<2%	<2%	达到任务书要求
指标 1.4 系统触发率	>10Hz	>280Hz	好于任务书要求

方向二的中期任务完成状态及与任务书的对照如下表：

表 2. 液氩探测器大规模波形数字化电子学的中期完成情况

	任务书中的中期指标值	中期状态	结果
指标 2.1 读出通道数	>8 路	8 路	达到任务书要求
指标 2.2 测量动态范围	5pC~1nC	5pC~1nC (200 倍)	达到任务书要求
指标 2.3 模拟带宽	0~200MHz	0~240MHz	好于任务书要求

指标 2.4 采样率	500MSps	1GSps	好于任务书要求
指标 2.5 采样精度	12bit	14bit	好于任务书要求

2. 课题调整情况

无。

二、取得的重要进展及成果

1. 课题中期重要进展及成果

简要介绍课题研究工作的重要进展、阶段性成果（一般不超过 3 项）及前景。

■ PandaX-III TPC大规模低本底低噪声读出电子学研究方向

1) PandaX-III 实验读出电子学方案设计

在本项目的第 1 年度，本课题配合项目牵头单位上海交通大学，参与了 PandaX-III 方案设计报告（CDR）的讨论和撰写，并具体承担读出电子学相关章节。

根据 CDR 及课题任务书，PandaX-III 读出电子学的主要技术指标如下：

（1）读出通道数：根据任务书，需要实现>6000 路读出通道（项目开展过程中，根据探测器方案的实际情况，最终需要实现 10496 路阳极信号及 82 路丝网信号，共计 10752 通道的信号读出）；

（2）积分非线性：小于 2%；

（3）噪声：小于 10fC（项目开展过程中，根据探测器组给出的信号特征对该指标进行了重新评估，根据项目实际需要，最终实现的读出电子学系统噪声应小于 6fC，与任务书指标兼容）；

（4）系统触发率：>10Hz。

根据 PandaX-III 实验的总体需求及探测器信号的特点，课题组对国际上主流的 ASIC 芯片进行了调研，最终选择了法国 Saclay 实验室的 AGET 芯片作为读出电子学的核心器件。该芯片在电荷灵敏放大+成形之后，采用开关电容阵列记录

该信号的完整波形，其输出的是成形后波形的完整信息，满足本项目的读出需求。

在选定了 ASIC 芯片之后，我们开展了读出电子学方案预研，设计了基于 AGET 芯片的原型电子学，验证了技术路线的可行性。

在预研的基础上，并考虑到 PandaX-III 实验的实际情况，课题组提出了如图 1 所示 PandaX-III 实验的读出电子学系统方案。PandaX-III Micromegas 探测器的阳极条信号和丝网信号通过转接板（AdB）分别连接到前端读出板（FEC）和 Mesh 读出板（MRC），这些电路板和探测器一起放置在水罐里以提供最好的屏蔽；前端读出板和 Mesh 读出板输出的数据则通过光纤传输给后端的数据汇总模块（S-TDCM）和时钟触发模块（MTCM），从而将数据通过以太网传输给计算机进行分析处理。

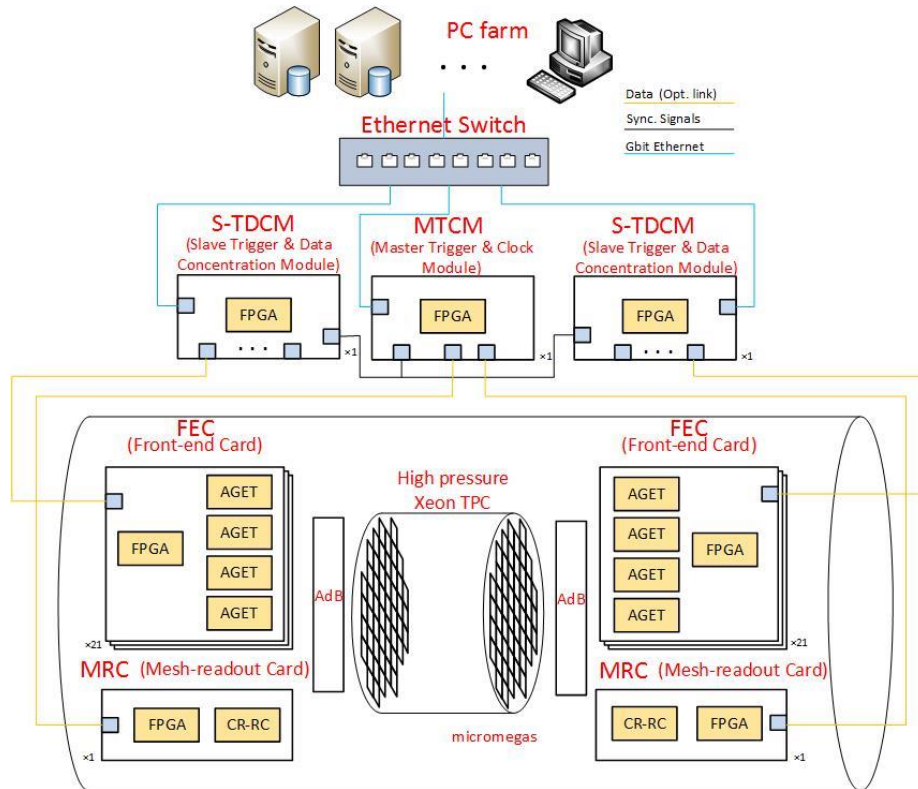


图 1. PandaX-III 读出电子学的结构框图

前端读出板（FEC）作为读出系统的核心，负责完成对 Micromegas 探测器的阳极条信号进行放大成形、模数转换。每块 FEC 可读出 256 路信号，单个 TPC 端盖需要 21 块前端读出板，整个系统则共需要 42 块。Mesh 读出板

（MRC）负责对 Micromegas 探测器的丝网信号进行放大成形、模数转换等。每块 Mesh 读出板可读出 42 路模拟信号，因此单个 TPC 端盖只需 1 块 Mesh 读

出板，整个系统需要 2 块。其次 S-TDCM 负责将 FEC 板上的实验数据汇总并
 进行处理，并负责对 FEC 板分发时钟、触发命令等信息。MTCM 负责产生系
 统同步时钟，接收 MRC 板发送触发信号，产生系统总触发信号，分发给 S-
 TDCM，实现系统触发同步。如图 2 所示为前端读出板的原理框图。

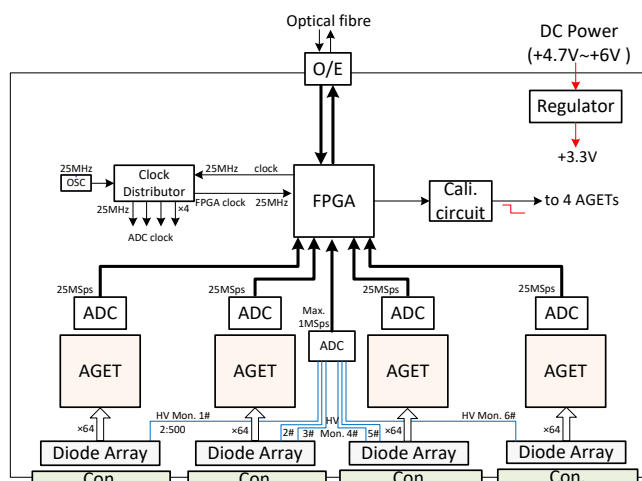


图 2. 前端读出板原理框图

2) PandaX-III 实验读出电子学原型的研制及探测器联调

两年来，课题组完成了三个版本的前端读出板（FEC-V1、V2、V3）、3 个
 版本的数据获取板（DAQ）以及第一版时钟触发板（MTCM-V1）的设计。其
 中 DAQ 板相当于正式运行时图 1 的数据汇总模块（S-TDCM）和时钟触发模块
 （MTCM）的原型，而目前的 FEC 则相当于正式 FEC 的实验室验证版，主要
 用于电子学功能和指标验证、以及与上海交通大学原型 TPC 探测器的联调。

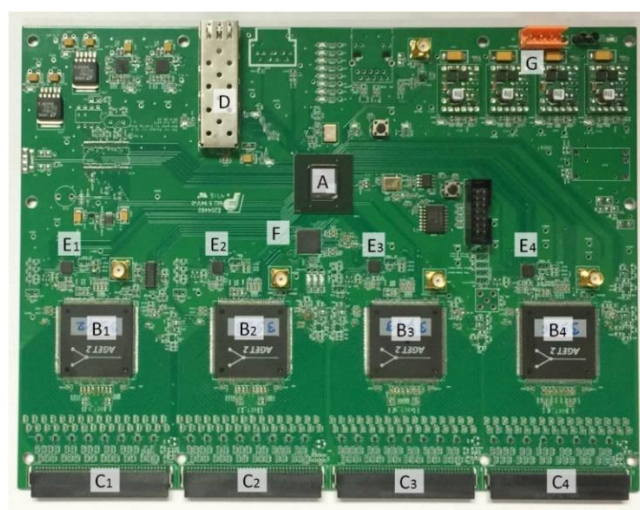


图 3. 研制完成的 FEC 板（V2）实物照片

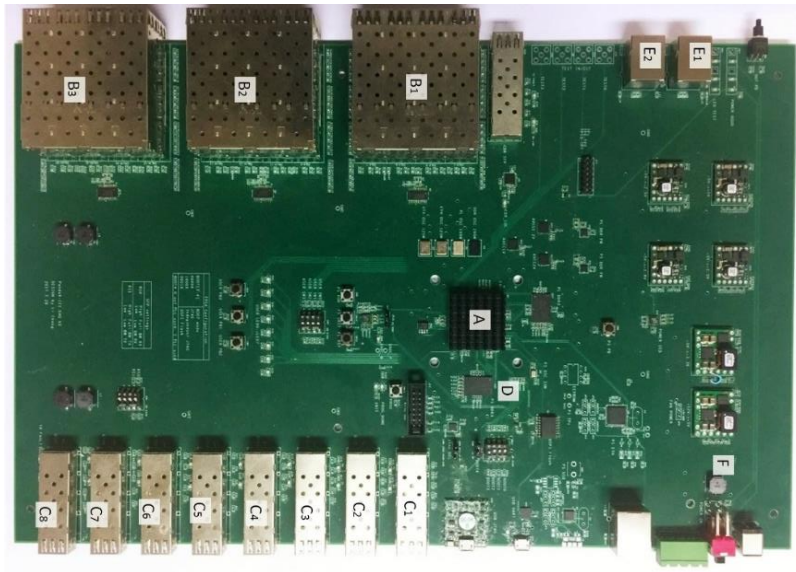


图 4. 数据获取板 (DAQ-V3) 实物照片

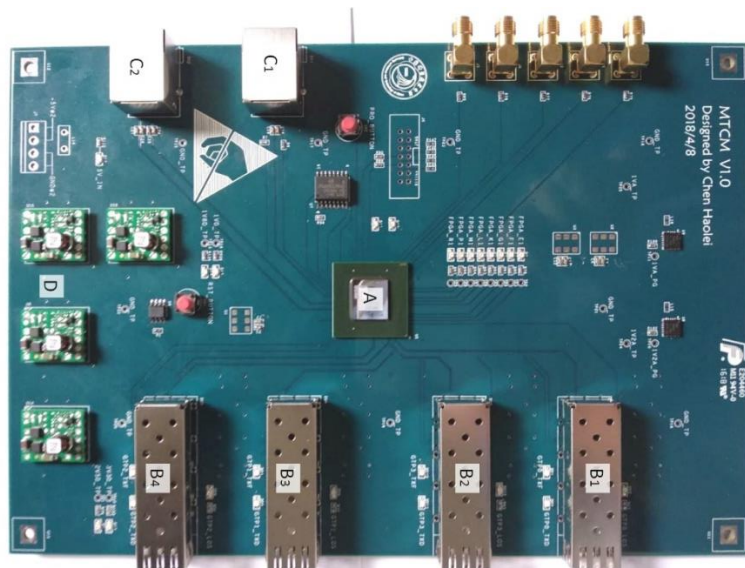


图 5. 时钟触发板 (MTCM-V1) 实物照片

为满足上海交大 40 公斤级原型 TPC 的读出需求，课题组复制了 4 块 FEC，配合数据获取板，搭建了一个 1024 通道的原型读出系统，通道数超过中期目标（1000 通道），在实验室开展了 4 块 FEC 板与 DAQ 板的小系统联调，如图 6 所示。经测试，各电路模块功能正常，FEC 与 DAQ 之间的数据传输完全符合设计要求。利用信号发生器进行实测，系统触发率可达到 280Hz 以上，好于任务书要求的 10Hz。



图 6. 原型电子学（4 块 FEC，合计 1024 通道）测试现场

实验室测试完成后，课题组还于 2017 年 1 月、2017 年 6 月、2018 年 1 月、2018 年 3 月四次赴上海交通大学开展了读出电子学与 40kg 的原型 TPC 探测器的联调测试。测试现场如图 7 所示。通过联调测试初步证明了读出电子学与原型 TPC 的 Micromegas 探测器能够配合工作，且电子学性能符合预期，但进一步的联调测试还有待开展。

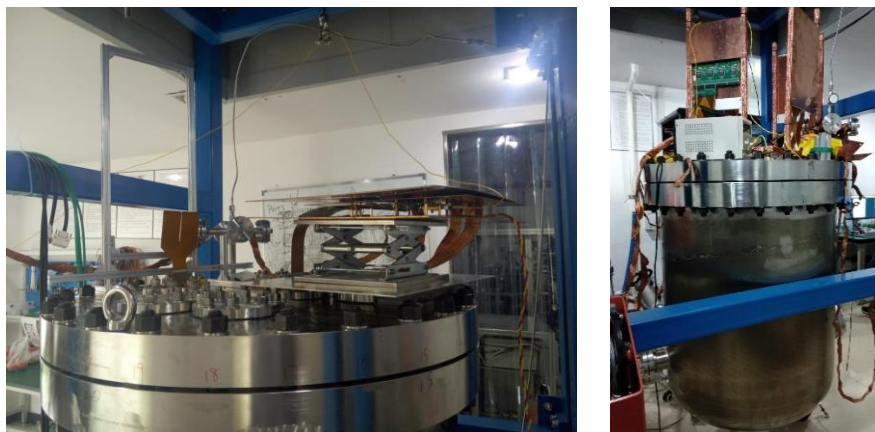


图 7. 读出电子学与原型 TPC 的联调测试现场

■ 液氩探测器光电倍增管大规模波形数字化研究方向

1) 液氩探测器读出电子学方案设计

该研究方向是针对暗物质直接探测实验的需要，为吨级液氩探测器的多路光电倍增管设计多通道、高精度的波形数字化系统。为保证吨级液氩探测器多通道数据的高精度同步以及事例重建的精确性，需要多读出机箱系统级同步技术，提

供极低抖动的严格同步时钟信号，并对海量数据实时并行读出，以提供多通道高精度波形数字化所需要的高数据率传输能力。

为此，本课题提出了以 PXIe 机箱为基础的，能够满足 100 通道 PMT 快信号读出的电子学系统方案，如图 8 所示。

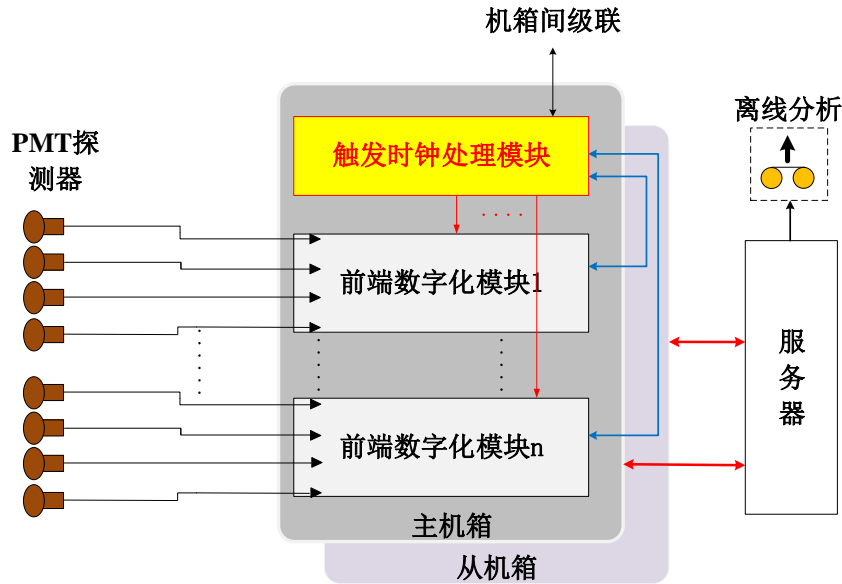


图 8. 液氙探测器读出电子学系统结构框图

该读出系统的核心是前端数字化模块（简称 FDM），其主要功能是对 PMT 探测器的信号进行波形数字化。采用双通道 ADC 芯片 AD9680 作为核心器件，该芯片的指标为 14bit、1GSPS（好于任务书的 12bit、500MSPS 要求），能记录更多的信号细节，给未来的数据处理带来更大的灵活度和物理性能的提升。每块 FDM 将具有 4 个输入通道，设计为 3U PXIe 插件的形式。

其次还需要设计触发时钟处理模块，通过机箱的差分星形线 A、B 下发全局同步时钟和触发信号；FDM 通过差分星形线 C 将触发所需信息传给本机箱的时钟触发模块；主从机箱的时钟触发模块之间由光纤进行通信。

根据系统规模的要求，FDM 单板要求完成 4 个通道的信号读出，共需要前端数字化模块 25 个，总共需要 PXIe 机箱 2 个，即 1 个主机箱，一个从机箱。每个机箱里插有 1 个触发时钟模块和多个前端数字化模块。PMT 信号通过电缆直接连接（或经过快前放之后）到 FDM 进行波形数字化后，再由机箱上传到服务器，用作离线分析。

2) 电子学研制和测试

在 2006-2007 年度,为了初步验证关键器件(AD9680)及关键技术(包括 ADC 的 JESD204B 高速串行接口)的可行性并掌握其设计方法,课题组设计了 2 通道的原型前端数字化模块,如图 9 所示。经测试,原型电路各项功能均得以实现,且各项指标与数据手册吻合,达到了预期目的。

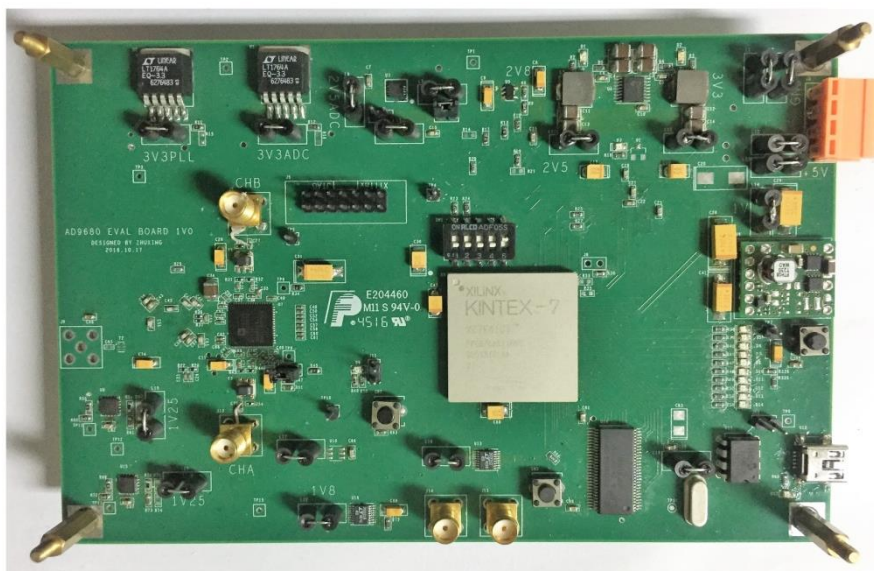


图 9. 本课题研制的原型前端数字化模块电路实物

随后,课题组于2007年两次赴高能物理研究所,与液氩探测器开展了联调测试,测试现场如图10所示。



图 10. 原型电子学与液氩探测器联调现场

经过测试,不仅验证了原型电子学模块的数据采集功能,且完成了 PMT 信号的初步联调,且各项指标都达到或好于任务书要求。

随后，在原型电子学模块成功联调的基础上，课题组在 2018 年度开展了正式版本的读出电子学（包括 FDM 与快前置放大器）的设计。

如图 11 所示为设计调试完成的 FDM 模块，与原型电子学相比，一方面通道数从 2 通道升级为 4 通道，另一方面还设计成标准的 PXIe 插件。图 12 是 FDM 安装到 PXIe 机箱中的测试现场。

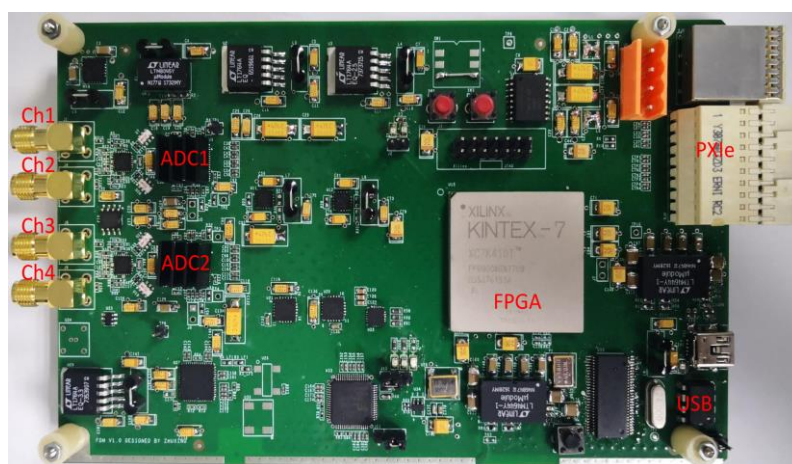


图 11. 前端数字化模块（FDM-V1）实物照片

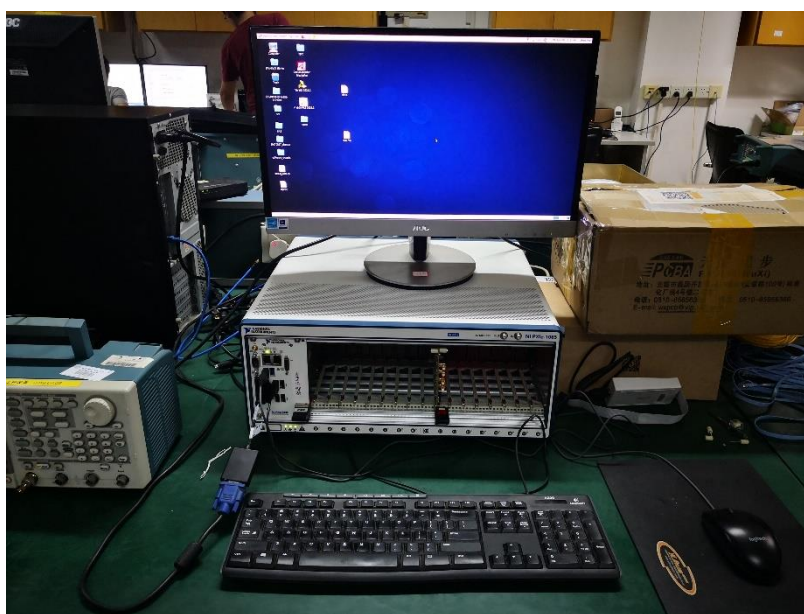


图 12. FDM 在 PXIe 机箱中的测试现场

与此同时，课题组还于 2018 年度开展了前置放大器的研制工作，目前第一版设计实现的放大器模块具有 4 个通道，测试得到模拟带宽为 240MHz 以上，放大倍数 6 倍，能够满足高能物理所研制的液氩探测器的 PMT 信号的放大与调理需求。

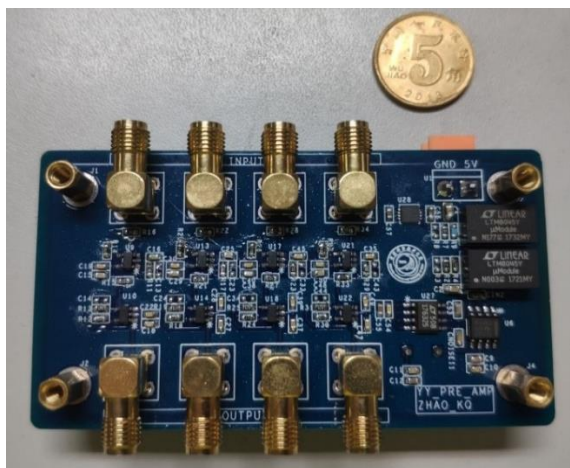


图 13. 设计完成的第一版前置放大器

目前第一版 FDM、前置放大器都已经完成了测试，不仅验证了技术方案的可行性，各项性能指标也都达到或好于任务书的要求，目前已复制了 2 块 FEC，可构成一个 8 通道的采集系统，随时可与液氩探测器进行联调。经与高能物理研究所协调，下一次联调即将于 2018 年 8 月开展。

2. 预期社会经济效益

重点阐明对学科/行业产生的重要影响，对社会民生、生态环境、国家安全等的作用，以及研究成果的合作交流、转移转化和示范推广情况，人才、专利、技术标准战略在课题中的实施情况等。

(1) 科学价值和应用前景

课题所研究的大规模高压氩气 Micromegas 探测器读出电子学，对于推动新型微结构气体探测器在国内的应用具有重要意义，针对这一物理实验所探索的微结构气体探测器的读出方法，在核物理、核医学、工业 CT 等领域也具有应用价值。

本课题所探索的大规模低本底电子学，在国内属于首次，具有开创性的意义，对于我国未来的其他地下实验也具有参考价值。

(2) 论文成果及学术交流情况

- [1] Cheng Li, Changqing Feng, Jianing Dong, Danyang Zhu, Shubin Liu, Qi An, Design of the FPGA-based Gigabit Serial Link for PandaX-III Prototype TPC[J], Radiation Detection Technology and Methods, (2017) 1:25.
- [2] C. Li, C.Q. Feng, D.Y. Zhu, S.B. Liu and Q. An, An optical fiber-based flexible readout system for micro-pattern gas detectors, 2018 JINST 13 P04013.
- [3] 董家宁, PandaX-III TPC Micromegas 前端读出电子学设计进展, 第六届全国微结构气体探测器研讨会, 2016年11月, 北京 (口头报告)
- [4] 李诚, PandaX-III TPC Micromegas 数据读出电子学设计进展, 第六届全国微结构气体探测器研讨会, 2016年11月, 北京 (口头报告)
- [5] 朱丹阳, PandaX-III TPC MicroMegas Mesh 读出电子学设计进展, 第六届全国微结构气体探测器研讨会, 2016年11月, 北京 (口头报告)
- [6] 董家宁, PandaX-III 读出电子学设计, 第十二届全国粒子物理学术会议, 2016年8月, 合肥 (口头报告)
- [7] 李诚, Design of the FPGA-based Gigabit Serial Link for PandaX-III Prototype TPC, The Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 conference, 2017年5月, 北京
- [8] 封常青, Progress of PandaX-III readout electronic, The Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 conference, 2017年5月, 北京 (口头报告)
- [9] 封常青, PandaX-III 前端读出电子学进展, 第七届全国先进气体探测器研讨会, 2017年11月, 南宁 (口头报告)
- [10] Danyang Zhu, et al, Development of the Front-End Electronics for PandaX-III Prototype TPC, 21th IEEE Real-Time Conference, Williamsburg, June 2018 (oral).
- [11] S. Liu, et al, Design of Mesh-Signal Readout Electronics for PandaX-III Prototype TPC, 21th IEEE Real-Time Conference, Williamsburg, June 2018 (poster).
- [12] X. Zhu, et al, Design of Prototype Front-end Digital Module for Direct Dark Matter Detection based on Lar, 21th IEEE Real-Time Conference, Williamsburg, June 2018 (poster).

（3）人才培养情况

自 2016 年度立项以来，通过本项目的支持，课题组一共培养了 2 位博士毕业生、1 位硕士毕业生和多位本科毕业生。其中博士、硕士毕业论文如下：

- [1] 田静，基于 AGET 芯片的时间投影室前端电子学研究，中国科学技术大学硕士论文（2016 年 6 月）。
- [2] 董家宁，PandaX-III 实验前端读出电子学方法研究，中国科学技术大学博士论文（2017.6）
- [3] 李诚，PandaX-III 实验读出电子学系统研究，中国科学技术大学博士论文（2018.6）

（4）成果推广应用情况

目前国内的微结构气体探测器研究正在如火如荼的发展，应用场合也正在不断拓展，但在读出电子学系统设计方面，国内却还比较滞后。这导致少部分探测器研究团队仍然在采用传统的商业放大器和 NIM 插件来开展气体探测器的读出或性能测试，不仅成本高昂，也限制了系统规模。另一部分实验组即使采用多通道 ASIC 芯片，也往往是进口现成的前端电路模块来搭建读出系统，读出系统的灵活性、通用性和可扩展性方面受到限制。

中国科大所在的项目团队最早自 2013 年就在刘树彬教授（本课题负责人）的带领下，开展了微结构气体探测器可扩展读出系统的研究并取得了初步成果。在前期成果的基础上，通过本课题的进一步支持，通过为 PandaX-III 实验研制读出电子学系统，我们发展起来了一套基于 AGET 芯片的采用全光纤链路、具有可扩展性的读出电子学系统，不仅能够满足 PandaX-III 实验的需要，对于其他类似的微结构气体探测器（Micromegas、GEM）具有一定的通用性，吸引了国内许多单位的兴趣。

在不影响 PandaX-III 项目进度的前提下，课题组封常青副教授申请了所在的核探测与核电子学国家重点实验室的自主课题，在 PandaX-III 读出电子学成果的基础上，开展了“微结构气体探测器通用可扩展电子学系统”的研究，研制完成的 AGET 通用电子学系统目前已经在高能物理研究所、中科院近代物理研究所、散裂中子源、中国科学院大学与广西大学等单位进行了试用，为这些兄弟

单位的气体探测器研究提供了极大方便。

三、课题人员及经费投入使用情况

1.人员及经费投入情况

对照课题任务书阐述课题及课题资金（包括专项经费、自筹经费等）到位情况、课题资金单独核算情况、预算调剂情况、支出情况和经费使用监督管理情况、人员投入情况等。

除作为科研骨干参与电子学设计、调试和测试的研究生（包括多位本科生）外，本课题投入的主要人员如下表所示：

序号	姓名	性别	技术职称	职务	学位	人员分类	工作单位
1	刘树彬	男	正高级	教授，副系主任	博士	课题负责人	中国科学技术大学
2	封常青	男	副高级	副教授	博士	课题骨干	中国科学技术大学
3	汤家骏	男	正高级	研究员、副处长	学士	课题骨干	中国科学技术大学
4	金西	男	副高级	副教授	学士	课题骨干	中国科学技术大学
5	王砚方	男	正高级	教授 (退休返聘)	学士	其他	中国科学技术大学
6	王颖颖	女	其他	质量管理员	学士	其他	中国科学技术大学
7	花敬娟	女	其他	技师	其他	其他	中国科学技术大学

到目前为止，本课题经费到位及支出情况如下：

序号	专项经费执行情况				
	资金预算	资金已到位	资金到位率	实际支出	实际支出占预算%
1	850.87	613.83	72.14%	241.95	28.44%

2.课题经费拨付情况

课题牵头单位向课题承担单位、课题承担单位向课题参与单位拨付中央财政资金情况。

本课题由中国科学技术大学独立承担，不涉及向其它参与单位拨款。

3. 人员及经费实际调整情况

如出现课题人员的调整，以及经费未及时到位、停拨、迟拨等特殊情况，请详细说明原因、措施、履行相关审批管理制度以及整改等情况。

无。

四、课题配套支撑条件情况

阐述各主要研究任务的配套支撑条件落实及调整变化情况。如有调整变化，请说明调整变化对完成课题目标的影响和作用。

课题组所在单位（中国科学技术大学）为本课题的执行提供了良好的支撑条件，能够满足本课题研究工作的需要。

五、组织实施风险及应对情况

阐述课题在组织实施过程中，面对外部政策、组织管理、研发变化和知识产权等方面的风险以及应对措施。

核心元器件的货源风险：

本课题两个方向的研究工作都是在进口的元器件基础上开展的，核心器件包括自法国 Saclay 实验室进口的 ASIC 芯片（AGET），以及自美国进口的高性能 FPGA 和高速高精度 ADC 等。

目前来看，FPGA 和 ADC 芯片暂时不存在禁运或采购渠道的风险。

但 AGET 芯片方面，Saclay 实验室该芯片的存货只剩数百片，目前的库存无

法满足全世界范围内的用户需求，而且即使由 Saclay 实验室重新流片、封装，也会极大影响进度。课题组已经提前识别到该风险，并已经于 2017 年度下订单采购了 200 片芯片，足以满足 PandaX-III 实验的需求。

六、课题组织实施中的重大问题及建议

无。

七、任务书中有特殊约定或其他需要说明的事项

无。