

中国科学技术大学

博士学位论文



基于 Micromegas 的高分辨 缪子成像系统读出电子学研究

作者姓名： 王宇

学科专业： 物理电子学

导师姓名： 刘树彬 教授 沈仲弢 副研究员

完成时间： 二〇二一年五月二十八日

University of Science and Technology of China
A dissertation for doctor's degree



Readout Electronics for High Resolution Muon Imaging System Based on Micromegas

Author: Wang Yu

Speciality: Physics Electronics

Supervisors: Prof. Liu Shubin, A.P. Shen Zhongtao

Finished time: May 28, 2021

2021-12-17 完成版本

中国科学技术大学学位论文原创性声明

本人声明所呈交的学位论文，是本人在导师指导下进行研究工作所取得的成果。除已特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含任何他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名：_____

签字日期：_____

中国科学技术大学学位论文授权使用声明

作为申请学位的条件之一，学位论文著作权拥有者授权中国科学技术大学拥有学位论文的部分使用权，即：学校有权按有关规定向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文编入《中国学位论文全文数据库》等有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。本人提交的电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

☒ 公开 ☐ 保密（____年）

作者签名：_____

导师签名：_____

签字日期：_____

签字日期：_____

2021-12-17 完成版本

摘 要

自伦琴发表了历史上第一张 X 射线成像结果, 粒子成像技术从实验室研究走向了生产生活的方方面面。电子、质子、中子、 γ 射线等粒子都可以作为探针, 对物质内部结构进行探测。不同的粒子有着不同的穿透能力, 对应着不同的成像应用技术方向。

粒子成像技术的本质是对粒子和物质的相互作用进行探测, 并利用相互作用规律对空间物质分布进行成像。在核屏蔽材料检测、火山监控、大型建筑物成像、地质探测等应用场合中, 常见的人造射线源无法穿透待测物质, 也很难提供大面积覆盖, 难以对此类物体进行探测成像。宇宙线缪子恰好能弥补这一缺陷, 宇宙线缪子具有极强的穿透能力, 能穿透数百米厚的岩石; 同时, 宇宙线缪子作为一种天然的射线源, 获取方便, 对人体无辐射危害, 能在各种场合开展相应的成像实验。

目前, 国际上已有多个研究小组展开了宇宙线缪子散射成像和透射成像研究, 验证了宇宙线缪子对大尺度物体和重核物质成像的能力。然而, 大多数实验存在着成像时间过长和成像精度不高的缺点, 无法满足成像需求, 成像系统还需进一步研究。本研究基于宇宙线缪子成像的特点, 开展相关的性能分析、读出电子学研究和相应的成像实验。

本文利用粒子物理仿真软件包 GEANT4 和宇宙线粒子产生源 CRY (Cosmic-RaY shower generator), 对缪子成像过程进行仿真。通过仿真模拟, 探究不同位置分辨率对系统成像质量和物质区分能力的影响。位置分辨率越好的探测器, 将能在短时间内获得质量更好的成像结果。Micromegas 探测器作为一种典型的微结构气体探测器, 具有位置分辨率高、成本低、易大面积制作的特点, 适合用于缪子成像实验。本文将基于 Micromegas 探测器, 开展相应的读出系统研究。

较好的位置分辨率需要较多的电子学通道对其进行读出, 将极大地增加系统复杂度和成本, 这也是目前高分辨缪子成像系统所面临的挑战之一。本文基于宇宙线缪子事例率低、击中位置稀疏的特点, 开展了相应的编码读出方案研究。完成了基于哈密顿回路的编码方案, 利用该编码方案开展宇宙线成像实验, 可以将读出通道数降低一个量级, 同时满足宇宙线缪子成像需求。

针对宇宙线缪子成像应用场景复杂、系统体量大的特点, 本文开展了通用、可扩展的缪子成像读出电子学系统研究。采用前、后端电子学分立的架构, 利用自定义协议的光纤实现不同电子学间通信, 可以满足不同量级成像实验装置的读出需求。结合编码读出方案, 单个前端电子学板可以读出 2048 路探测器通道; 后端电子学板通过光纤, 实现数据汇总处理、时钟触发分发和慢控制等功能。经

测试，该读出电子学能满足宇宙线缪子成像实验的需求。

完成编码读出方案和电子学方案设计后，本文搭建了由 8 层探测器组成的散射成像实验样机和由 4 层探测器组成的透射成像实验样机。基于散射成像实验装置，开展了成像和物质区分实验，本套装置可以实现 2 cm 尺寸物质的成像，并且可以实现对铅、钨、铁或铜的区分。透射成像实验装置可以完成不同方向缪子通量的测量，并实现建筑物成像。实验结果表明读出电子学系统能满足缪子散射成像和透射成像两种应用需求。

最后，本论文从技术发展和应用发展两个方向出发，提出了针对宇宙线缪子成像的进一步研究目标。

关键词：缪子成像；读出电子学系统；编码读出；Micromegas 探测器

ABSTRACT

Since Wilhelm Conrad Röntgen published the first X-ray imaging result in history, particle imaging technology has profoundly influenced all aspects of productive life. Except for X-ray, electron, proton, neutron, and γ -ray can also be used as probes to detect the inner structure of matters. Different particles are applied to different imaging applications, depending on their penetration capabilities.

The basic principle of particle imaging is to detect the interaction between materials and particles, and infer the density distribution of the imaging area by using laws of interaction. In detecting nuclear shielding material, volcanoes, large-scale buildings, etc., not only cannot artificial rays penetrate the materials but also cannot cover such large areas. Consequentially, it is not easy to image these objects with artificial rays. However, the following two aspects make muography an excellent way to solve this problem. On the one hand, cosmic-ray muon could penetrate hundreds of meters of rock due to its strong penetration ability. On the other hand, cosmic-ray muon is a natural ray and exists everywhere in our daily life. It is harmless and convenient to obtain, making cosmic-ray an ideal probe to detect large structures and heavy nuclear matters.

At present, many research groups have launched cosmic-ray muon tomography and radiography experiments, which show the ability of muography to image large-scale objects and heavy nuclear matters. However, most experiments have the disadvantages of long imaging time and low imaging accuracy, which cannot meet the needs. Research on muon imaging facilities should be investigated more deeply to optimize the imaging quality and time. Based on the requirements of cosmic-ray muon imaging, this research carried out the performance analysis, readout electronics design, and imaging experiments.

At first, a simulation model is developed to reconstruct the process of muography with GEANT4 and CRY (Cosmic-RaY shower Generator) software libraries. The influence of spatial resolution on the imaging quality and material discrimination is well studied by simulation.

A muography facility with better position resolution needs more readout electronics channels and this will make the system more complicated and costly. Due to the low flux and sparse hit of cosmic-ray muon, the encoding readout method is introduced in this research. Moreover, a new encoding scheme based on Hamilton path is developed

and implemented. With this method, the needed channels of readout electronics can be reduced in an order of magnitude in cosmic-ray muography.

Aiming at the complex application scenarios and large system volume of cosmic ray muon imaging, this paper researches a general and scalable readout electronics system. The system employs a discrete architecture of front-end and back-end electronics and uses fiber optics cables with custom protocols to achieve communication between different electronics, which can be adapted to different scales of imaging experiments. A single front-end electronics board can read out 2048 detector channels with the encoding readout boards. The back-end electronics board completes gathering all the data from the front-end electronics and distributes clocks and triggers. Besides, slow control is realized on the back-end electronics. With exhaustive testing, this readout electronics system can satisfy the needs of cosmic-ray muon imaging.

Then, an 8-layer muon tomography facility and a 4-layer muon radiography facility were constructed. The imaging experiments and material discriminating experiments were implemented with the tomography facility. Results show that this facility can not only image objects with 2 cm size but also can distinguish lead, tungsten, iron, or copper. By measuring muon flux from different directions, the radiography facility can distinguish the area between the sky and buildings. All these test results indicate that the readout electronics system can meet the demands of both muon tomography and radiography experiments.

At last, this paper proposed some research goals for cosmic-ray imaging on both technology and applications.

Key Words: muon image; readout electronics; encoding readout technology; Micromegas

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 粒子成像技术的本质	1
1.1.2 针对重核物质和大尺度物体的成像需求	2
1.2 宇宙线缪子的产生与性质	3
1.2.1 宇宙线缪子的产生	3
1.2.2 缪子的性质	4
1.3 缪子成像的原理	5
1.3.1 缪子透射成像原理	6
1.3.2 缪子散射成像原理	7
1.4 宇宙线缪子成像研究进展	8
1.4.1 透射成像研究	8
1.4.2 散射成像研究	11
1.4.3 成像实验分析	14
1.5 本论文的主要工作	15
参考文献	16
第 2 章 缪子成像系统分析	23
2.1 成像系统仿真与指标分析	23
2.1.1 物质成像仿真	24
2.1.2 物质鉴别仿真	25
2.1.3 透射成像仿真	29
2.1.4 成像系统指标分析	30
2.2 Micromegas 探测器	30
2.2.1 Micromegas 探测器介绍	30
2.2.2 基于热压膜工艺的 Micromegas 探测器	32
2.3 读出电子学需求	33
2.3.1 动态范围和噪声分析	34
2.3.2 读出系统体量分析	34
2.3.3 触发系统需求分析	34
2.3.4 需求小结	35
2.4 本章小结	35

参考文献	36
第 3 章 读出通道压缩方案研究	39
3.1 通道压缩方案分析	39
3.1.1 读出通道压缩需求分析	39
3.1.2 通道压缩技术及其对比	39
3.2 编码读出方案研究	41
3.2.1 编码读出研究进展	41
3.2.2 直接编码读出方案的数学原理	44
3.2.3 现有的编码读出方案	47
3.3 哈密顿回路编码方案研究	48
3.3.1 编码方案进一步分析	48
3.3.2 基于哈密顿回路的编码方案	49
3.3.3 偶数通道编码回路构造证明	50
3.3.4 编码表及编码电路设计	52
3.3.5 解码算法设计	52
3.4 编码电路测试	53
3.4.1 噪声测试	53
3.4.2 噪声抑制能力测试	53
3.5 本章小结	56
参考文献	56
第 4 章 读出电子学系统研究	59
4.1 读出电子学架构设计	59
4.1.1 面向前端电子学的可扩展设计	60
4.1.2 面向数据存储系统的可扩展设计	61
4.1.3 触发方案设计	62
4.2 后端电子学设计与实现	63
4.2.1 后端电子学板设计	63
4.2.2 后端电子学逻辑功能设计	64
4.2.3 后端电子学测试	68
4.3 前端电子学设计与实现	69
4.3.1 前端电子学设计分析	69
4.3.2 前端电子学板介绍	70
4.3.3 前端电子学板逻辑功能设计	73
4.3.4 前端电子学板测试	76

4.4 电子学系统联调	79
4.4.1 功能测试	79
4.4.2 误码率测试	79
4.4.3 触发性能测试	80
4.5 本章小结	81
参考文献	81
第 5 章 缪子成像原型系统搭建与成像实验	85
5.1 缪子成像样机搭建	85
5.1.1 散射成像样机	85
5.1.2 透射成像样机	86
5.2 缪子成像平台测试	87
5.2.1 噪声测试	87
5.2.2 解码率测试	88
5.2.3 位置分辨率测试	90
5.2.4 效率测试	92
5.2.5 宇宙线沉积能量测试	93
5.3 散射成像实验	94
5.3.1 散射成像算法分析	94
5.3.2 成像实验	96
5.3.3 物质区分实验	100
5.4 透射成像实验	103
5.4.1 透射成像算法分析	103
5.4.2 成像实验	103
5.5 本章小结	105
参考文献	105
第 6 章 总结与展望	109
6.1 总结	109
6.2 展望	110
附录 A 编码表生成算法	111
附录 B “生产者-消费者”模式上位机设计	113
参考文献	113
附录 C 探测器本征位置分辨率计算	115

附录 D 基于梯度下降法对位置进行修正	117
参考文献	119
附录 E PoCA 算法处理过程	121
附录 F 散射成像实验结果	123
附录 G 电子学原型系统照片	127
致谢	129
在读期间发表的学术论文与取得的研究成果	131

第1章 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 粒子成像技术的本质

1895年，伦琴发表一篇名为《一种新的射线》^[1]的论文，第一次在实验中发现了X射线的存在。利用X射线较强的穿透能力，伦琴成功地用其完成了人体骨骼成像。此后，X射线成像在医学、工业等领域发挥着重要的作用^[2]。除了X射线之外，电子^[3]、质子^[4-5]、中子^[6]等粒子都可以应用到不同的成像场合。粒子成像技术的基本原理是粒子和待测空间中的物质发生相互作用，使得粒子的状态发生改变，通过探测粒子的状态信息，最终反推出空间及物质的性质。不同的粒子成像技术，依靠的是不同类型的粒子与物质发生相互作用^[7]。

以二维情况为例，粒子成像的原理如图1.1所示，其中 $f(x, y)$ 为空间中物质的分布函数。每个穿透待测空间的粒子都携带有空间中物质分布的信息，利用这些信息可以对空间中物质分布进行重建。在实际计算处理过程中，将待成像空间网格化为 N 个像元，则第 i 个粒子得到的测量量 s_i 如式(1.1)所示，其中 f_i 是空间每一个像元的分布函数， $w_{i,j}$ 为第 i 个粒子与第 j 个像元的相互作用量。

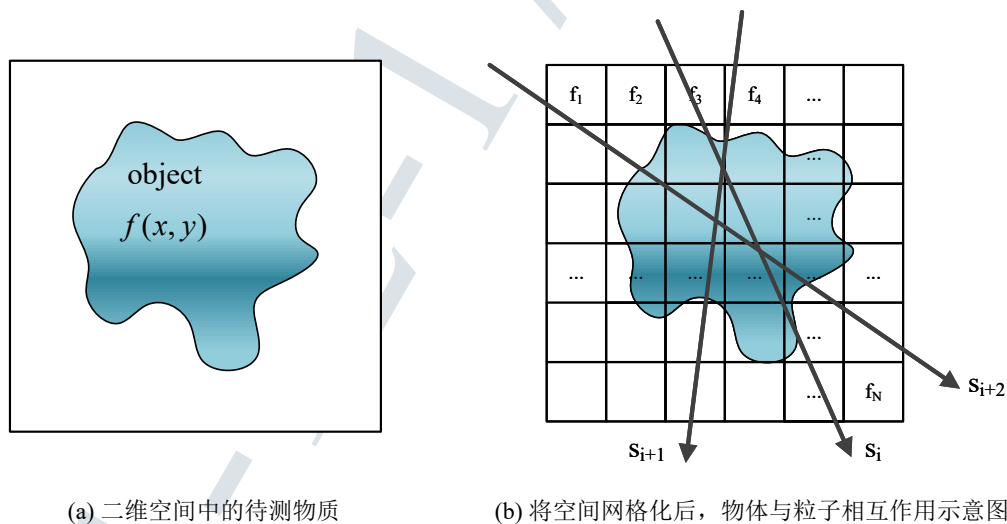


图 1.1 粒子成像原理示意图

$$s_i = \sum_{j=1}^N w_{i,j} \cdot f_j \quad (1.1)$$

由于不同粒子与物质发生相互作用的方式不同，根据不同成像方式，选用合适的指标作为 s_i 。在以吸收为主要相互作用的成像场合中，可以选择射线的吸

收比例作为式 (1.1) 中的 s_i ，而 $w_{i,j}$ 则可以根据射线的径迹或者统计规律来确定。如医学中的胸透技术，利用骨骼和人体软组织对 X 射线的阻挡能力不同来进行成像。在以散射为主要相互作用的成像场合，可以选择射线的偏移量作为 s_i ，如电子散射成像，通过磁透镜聚焦电子，测量其穿过物质之后的偏转量来实现成像^[3]。

因此，成像技术的规律可以总结为：利用粒子与物质的相互作用及其规律，对空间物质分布信息进行反推。几种成像所用粒子的穿透能力如图 1.2 所示，粒子的穿透能力决定了应用场合。

质子穿透能力最弱，适用于密度较小物体成像；电子穿透能力稍强，可以用于物质表面结构或者微小尺寸物体成像；X 射线可以穿透铝板和人体组织，适合用于安检、医学等成像场合；中子由于不带电，可以穿透铅等屏蔽材料，易被含氢、锂或硼较多的材料阻挡，目前已经被应用至一些特殊材料成像场合。然而，所有用于成像的人工射线，都有相应的手段将其屏蔽。在针对重核物质和大尺度物体成像方面，人工射线成像还显得不足。

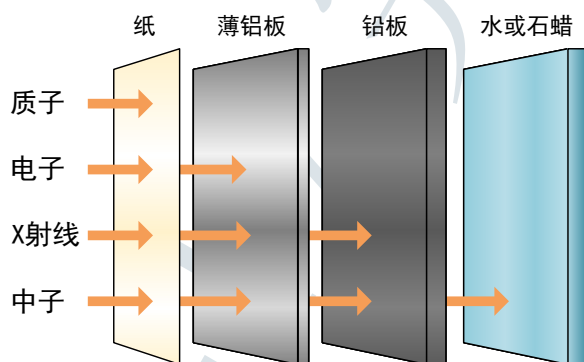


图 1.2 X 射线、电子、质子、中子穿透能力示意图

1.1.2 针对重核物质和大尺度物体的成像需求

随着安全检测需求不断提升，对屏蔽装置中的核材料进行检测，成为了一个愈渐重要的议题。国际上发生了多次核材料走私和偷运的情况，据国际原子能机构（IAEA, International Atomic Energy Agency）的事件和贩卖数据库（ITDB, Incident and Trafficking Database）显示：从 1993 年至 2019 年底，记录在案的核材料交易事件就有 3686 起，其中 290 起交易的核材料已经被确认用于恶意用途，还有 1023 起交易用途不明^[8]。然而，在实现可约束核聚变发电之前，核裂变发电技术势必会伴随着人类的可持续发展历程，核燃料也会越来越多地应用到生产活动中。现今，世界各国已经在尝试建设小型商用核电站，如俄罗斯的水上浮核电站罗莫诺索夫院士号（Akademik Lomonosov）^[9]、美军研制中的可拆卸式

核电站^[10]、获得美国核监管委员会最终安全评估报告的核能公司 NuScale 公司的模块化反应堆^[11]。虽然核聚变发电拥有巨大的优势和广阔的应用前景，但是安全保障是其发展和应用的前提。如果没有一套行之有效的监控和探测技术，滥用核燃料将会带来无法挽回的灾难。2019 年 9 月，我国国务院新闻办发布了《中国的核安全白皮书》，提出了要实施科学有效安全监管，核安全是国家安全的重要内容^[12]。

在运输过程中，危险核燃料和放射性材料都会被铁、铅、含锂或硼的化合物等材料包裹，以屏蔽其自身放射性，这也使得 X 射线、中子、质子等成像手段无法对其进行有效探测。如使用 γ 射线对货箱中的核燃料进行检测时，20 cm ~ 30 cm 的铁板就可以将其屏蔽^[13]，导致无法进行有效检测。此外，使用人造射线源进行成像，尤其是对可能存在人员的货箱进行检测时，还需考虑电离辐射危害的影响，进一步限制了人工射线的探测能力。如何安全、准确和快速地对屏蔽装置中的核材料进行检测，是当下亟需解决的一大难题。

在火山、地质结构、建筑物等大尺度物体探测方面，人工射线由于穿透能力不足、覆盖面小也无法满足需求。火山喷发事件一直都是生活中的重大安全隐患之一，仅 2020 年就发生了 14 起火山喷发事件^[14]，每一次火山喷发都会给当地居民造成巨大的生命财产威胁。研究显示，火山喷发规律呈现出 15 ~ 25 年的周期变化^[15]，而火山喷发的机制仍处于探索阶段。若能对已知的活火山进行监测，将会帮助我们更有效地预测火山喷发事件，进一步探寻火山喷发背后的机制。此外，在古建筑成像和地质探索方面，对成像探测技术也有较强的需求，若能对这些大型物体内部进行成像和探测，将会扩展相关领域的研究范围。

除人造射线源外，在地球表面，还有一种无处不在的射线——宇宙线缪子，其具有穿透强、覆盖范围大、无辐射危害等优点，能解决上述应用所面临的困难。然而，宇宙线缪子成像技术发展尚未成熟，有大量的难点与挑战亟待攻克。目前，能用于成像实验的缪子都来源于宇宙线，人造缪子源尚不能产生满足实验需求的缪子。

1.2 宇宙线缪子的产生与性质

1.2.1 宇宙线缪子的产生

1912 年，人类第一次观测到宇宙线缪子，科学家 V. F. Hess 通过热气球实验上的探测器，发现其测量电流随着海拔上升而增大，预言一定有某种射线穿透了探测器^[16]；1933 年，J. Street 和 E. Stevenson 发现宇宙线成份中有一种未知的穿透能力极强的带电粒子^[17]，能穿透实验使用的屏蔽铅板。根据当时的实验数据，将这种带电粒子称为缪子 (Muon)。1947 年，在一个高山实验中，观测到宇宙线

中 π 介子衰变产生缪子的过程^[18]，第一次发现了宇宙线缪子的产生机制。

宇宙线缪子大部分产生于地球上层大气，属于次级宇宙线粒子。地球大气层之外的星际空间中充满了高能的宇宙射线，主要成分是稳定的带电粒子和长寿命的原子核，这些宇宙线被称为原初宇宙线。在原初宇宙线中约有 79% 的成分是质子，15% 的成分是原子序数不超过氦的原子核，其成分分布如图 1.3 所示^[19-20]。原初宇宙线在星际空间中被加速至极高的能量，进入地球大气后，会和空气发生大气簇射。在这个过程中，原初宇宙线中的质子和 α 粒子，与空气中的原子核发生相互作用产生重子和介子，这些粒子会继续和大气发生相互作用或者衰变。其中 π^0 衰变成一对光子， $\pi^\pm$ 和 $K^\pm$ 衰变成 $\mu^\pm$ 和相应的缪子中微子，其衰变的反应方程式如式 (1.2) 所示。相较于其它次级宇宙线成份，缪子和中微子穿透力更强，到达地表的宇宙线大部分也是缪子和中微子。

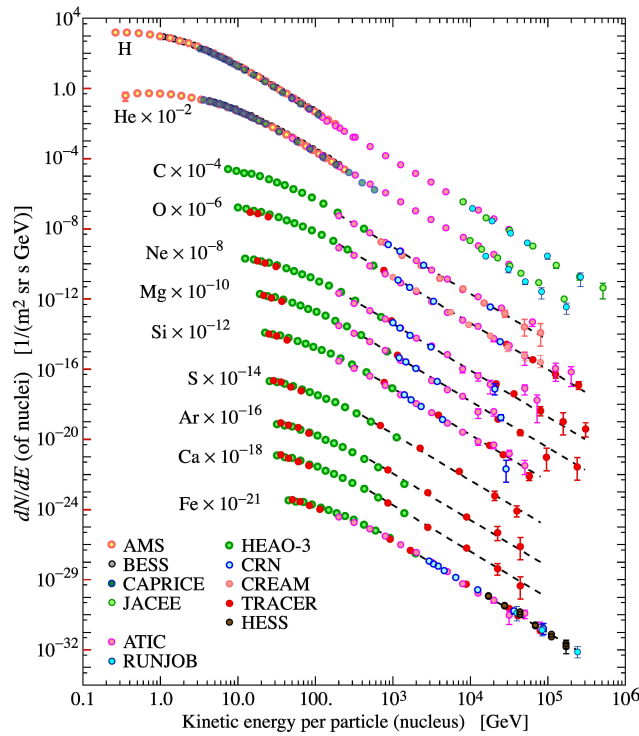


图 1.3 原初宇宙线成分分布^[19]

$$\begin{aligned}\pi^\pm &\rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \\ K^\pm &\rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)\end{aligned}\tag{1.2}$$

1.2.2 缪子的性质

缪子属于一种轻子，带一个负电荷，其静止质量为 $105.66\text{MeV}/c^2$ ，平均寿命为 $2.2\mu\text{s}$ ^[19]，反粒子带一个正电荷。相较于宇宙线中的其他成份，缪子的寿命更长（比如 $\pi^\pm$ 的寿命只有 26 ns）；宇宙线缪子的动量比较大，由于相对论效应，

在地球坐标系中，缪子在衰变前有很大的射程；同时，缪子的质量为电子质量的207倍，推导可得缪子的韧致能损只有电子的四万分之一。因此，缪子也比宇宙线中其他带电粒子有更长的射程，这也是缪子极强穿透力的原因之一。

图1.4为在不同大气深度条件下，不同宇宙线成份的垂直通量。在海平面附近，除中微子外，缪子是通量最大的粒子，比电子的通量要高出两个数量级。因此，在地面实验中，探测到的宇宙线成份主要是缪子（中微子反应截面极小）。

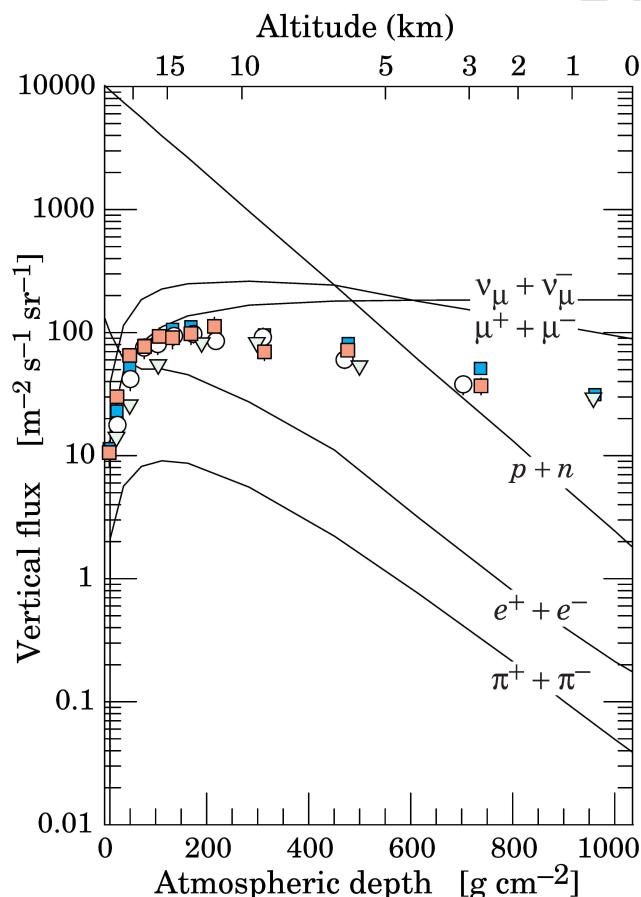


图 1.4 不同大气深度条件下，宇宙线各个成份垂直方向通量变化示意图 ($E > 1\text{GeV}$)^[19]

1.3 缪子成像的原理

作为一种带电粒子，缪子和物质的相互作用可以分为能量损失和多次库伦散射。利用这两种相互作用原理，可以实现缪子透射成像和缪子散射成像。透射成像利用缪子在物质中因损失能量而被吸收的原理实现成像，应用于山体等大尺度物体成像；散射成像利用物质原子核对缪子的多次库伦散射而成像，适用于重核物质成像。

1.3.1 缪子透射成像原理

带电粒子的能量损失如式 (1.3) 所示^[21], 其中 E 为入射粒子的能量, $b(E) \times E$ 表示辐射能损 (韧致辐射、对产生和光核作用) 部分; $a(E)$ 表示电离能损部分, 如式 (1.4) 所示。

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = b(E) \times E + a(E) \quad (1.3)$$

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \delta \left(\frac{\beta \gamma}{2} \right) \right] \quad (1.4)$$

对于特定能量的缪子, 当物质的厚度足够时, 缪子将会在物质中沉积全部能量, 即物质将缪子吸收了。缪子在物质中的射程可以通过式 (1.5) 进行计算^[22]。由于宇宙线缪子的能量主要集中在高能区, 在此时 a 和 b 可以视为一个常数, 可将式 (1.5) 可以进一步化简为式 (1.6), 其中 $E_{\mu c} = a/b$ 为临界能量。

$$R(E) = \int_{E_0}^E [a(E') + b(E') E']^{-1} dE' \quad (1.5)$$

$$R(E) \cong (1/b) \ln(1 + E/E_{\mu c}) \quad (1.6)$$

缪子透射成像是利用不同能量缪子穿透物质的能力不同而实现的, 可以类比于医疗中的 X 光成像。由于到达地面的缪子的能量具有一定分布, 经过了不同质量厚度的物质之后, 缪子被吸收的比率不同, 缪子的通量也会有所不同。因此, 通过对比有无待测物体情况下缪子通量的变化, 可以反推出待测空间中物质的质量厚度。缪子透射成像原理示意如图 1.5 所示, 当缪子穿透大尺度物质 (如山体) 时, 会有大量缪子因为山体的吸收而被阻挡, 因此在待测物体一侧放置径迹探测器系统, 则可以测量经过待测物质之后的缪子通量。根据缪子各向同性的特点^[19], 在相同探测器倾角的条件下, 测量没有待测物体遮挡时的缪子通量。两次测量结果之差为缪子由于山体阻挡而被吸收的量, 缪子被吸收的比例可以作为式 (1.1) 中的测量量 s_i , 再通过相应的分析即可得到待测物质在测量方向垂直面的投影成像。

为了得到定量的缪子透射成像结果, 对不同的材料, 定义其对缪子的透明度为 $\int \rho(x) ds$, 其中 $\rho(x)$ 为物体的面质量密度, 透明度描述了物体能够透过缪子的能力。由前面的描述可以得知, 缪子在物质中的电离能损很小, 只有电子的四万分之一。常见的米量级尺度的物质对于缪子而言, 几乎是透明的。但是当物体的尺度增加到几十米甚至上百米的量级时, 就会有一定的比率吸收一定能量的缪

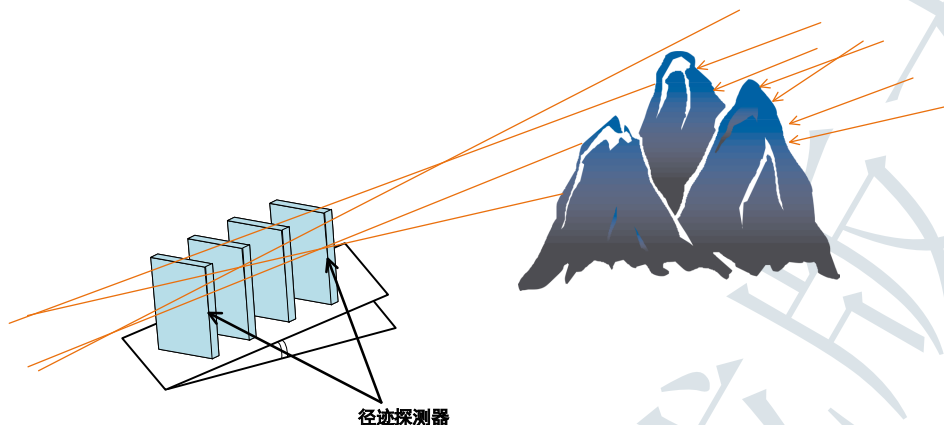


图 1.5 缪子透射成像原理示意图

子。在这种情况下，通过缪子的不同吸收比率，可以定量的反推出待测物质在对应方向的质量厚度。结合物体尺寸等信息，就能完成对火山、建筑和矿藏等物体内部信息的重建。

1.3.2 缪子散射成像原理

除了发生能量损失之外，缪子还会和物质原子核发生库伦散射，进而改变方向。将散射前、后径迹的夹角定义为散射角，材料种类、材料厚度和入射粒子动量是影响散射角大小的三个主要因素。多次库伦散射是一个随机的过程，将散射角投影到两个正交平面，每个平面的散射角投影分布可以近似为均值为 0，标准差为 $\sigma(\theta_0)$ 的正态分布，其中 $\sigma(\theta_0)$ 如式 (1.7) 所示^[19,23-24]，式中 z 为入射粒子的电荷量， p 为入射粒子的动量， βc 为入射粒子的速度， x 为物质的厚度或质量厚度， X_0 为物质的辐射长度。

$$\sigma(\theta_0) = \frac{13.6\text{MeV}}{\beta c p} Z \sqrt{x/X_0} [1 + 0.038 \ln(x/X_0)] \quad (1.7)$$

如前文所述，对于缪子而言，小尺度的物质几乎是透明的，吸收比率远小于探测到缪子数量的涨落，在这种情况下，缪子在物质中的电离能损可以忽略不计，主要起作用的是缪子和物质原子核发生的多次库伦散射。由式 (1.7) 可知，对于相同的入射粒子，其散射角的分布宽度近似与 $\sqrt{x/X_0}$ 成正比，物质的辐射长度可以通过式 (1.8) 计算，其中 Z 为物质的原子序数。式 (1.8) 可以近似为 $X_0 \propto Z^{-2}$ ，即原子序数较大的物质辐射长度更小。结合式 (1.7) 可以得到以下结论：在相同质量厚度条件下，散射角分布的标准差与物质原子序数近似成正比。

$$X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln(183/Z^{0.333})} \quad (1.8)$$

利用这一性质可以得到缪子散射成像的原理，如图 1.6 所示，在待成像空间上游和下游各放置一个径迹探测器，测量缪子的入射方向和出射方向。缪子将会和空间中的物质发生多次库仑散射，使用相应的算法对散射点进行重建，即可得到物质在空间中的分布。对于高 Z 物质，相同质量厚度条件下，其散射角更大，对不同区域的散射角进行统计，可以实现物质区分和鉴别。如 3 GeV 能量的缪子经过 10 cm 厚度的铁后，散射角分布标准差为 11.53 mrad，经过相同厚度的铀材料后，散射角分布标准差为 28.82 mrad。利用这一差异，可以实现对屏蔽材料中的重核物质检测。

相较于透射成像，散射成像对径迹测量系统提出了更高的要求，若径迹测量的晃动较大，则成像结果可能会出现较多噪点，对物质的区分度也将会下降。

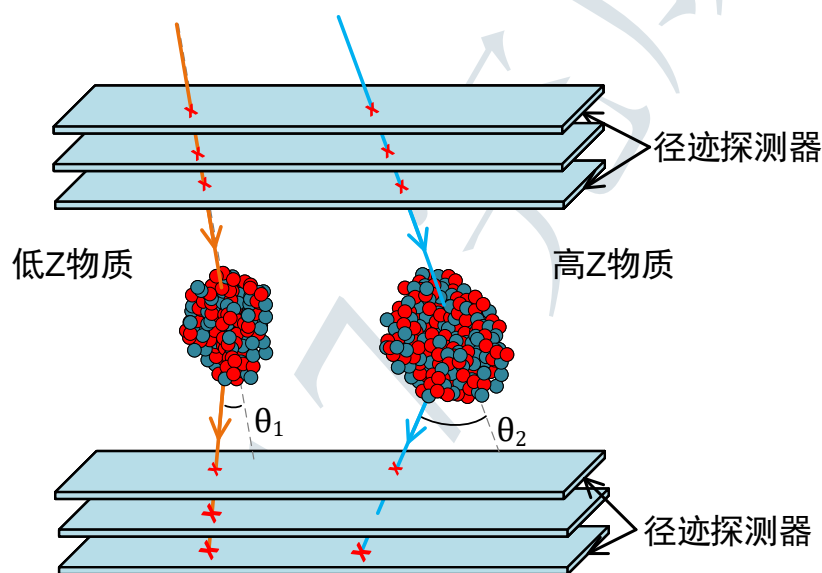


图 1.6 缪子散射成像原理示意图

1.4 宇宙线缪子成像研究进展

早在 1952 年，科学家注意到不同深度地下的缪子通量不同，并提出了可以利用缪子的这一性质对地下结构进行测量^[25]。由于当时粒子探测技术水平有限，成像实验未能顺利开展。随着粒子探测技术的发展，缪子成像这一设想已经逐步走向实现，国际上已有众多研究团队利用不同的探测器开展了缪子成像研究。

1.4.1 透射成像研究

1955 年，澳大利亚工程师 E.P. George 完成了历史上第一次缪子成像实验，该实验利用盖革计数器对澳大利亚 Guthega-Munyang 的一个隧道进行测量，通

过对比隧道入口处的宇宙线通量和隧道内部的宇宙线通量，成功地得到了隧道上方岩石的密度信息^[26]。1970年，诺贝尔奖得主 L. W. Alvarez 等人利用火花室，试图寻找隐藏在卡夫拉金字塔内部的空洞，其实验结果表明该金字塔内部没有未知的空洞^[27]。

随着粒子探测技术的发展，越来越多的现代化探测手段被应用到了缪子成像领域。同时，科学家们对金字塔探测的热情日愈高涨，2015年多国科学家发起了 ScanPyramids 计划^[28]，整个计划的目标是利用近红外成像、缪子成像、3D建模和重建技术，对埃及金字塔进行探测。其中，缪子成像小组在2017年11月率先发布了探测结果。通过数据分析，发现了胡夫金字塔主墓道上方存在一个隐藏的空洞^[29]，这个空洞也被称为“ScanPyramids Big Void”。图1.7所示为该实验测量所得结果，左图为使用核乳胶室测量到的缪子通量分布，右图为利用仿真软件得到的缪子通量分布。与仿真结果对比，主墓道上方空间出现了一个缪子通量更大的区域，因此反推出该位置处有物质缺失，即存在一个未知空洞。

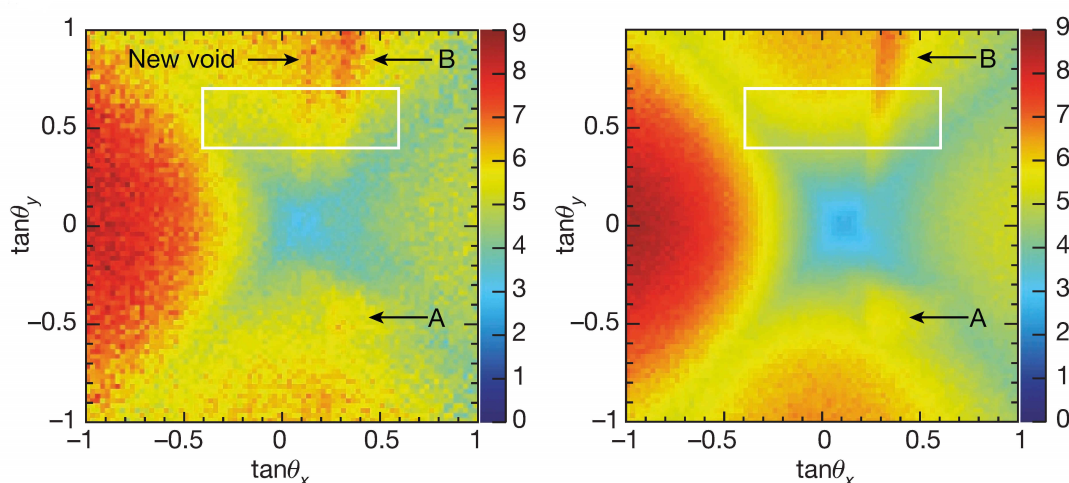


图 1.7 胡夫金字塔探测结果。A 所指位置为皇后墓室的位置，B 所指的位置为主墓道位置。左图为实际测量结果，右图为仿真结果，在主墓道旁边发现一个通量增大的区域^[29]

实验使用了核乳胶室、塑料闪烁体和 Micromegas 三种探测器，其中核乳胶室不属于实时数据获取系统，但是径迹测量精度很高，在实验中最先发现墓道上方的空洞。核乳胶室由日本名古屋大学（Nagoya University）研发制作而成，使用聚苯乙烯作为基板，在其两面均匀涂抹一层银卤化物和光敏剂混合物^[30]。当有带电粒子穿过核乳胶室时，其径迹上的银卤化物会被还原成银单质，从而记录下粒子的径迹。核乳胶室的位置分辨率可达 $1\ \mu\text{m}$ ，但制作、运输和数据处理过程较为复杂，不适合应用于大规模缪子成像实验。

另外两个探测器——塑料闪烁体探测器和 Micromegas 探测器，分别由日本高能加速器研究机构 (KEK) 和法国原子能和替代能源委员会 (CEA) 研制。塑料

闪烁体方案的探测器一共 4 层，每层由 120 根塑料闪烁体条构成，这些塑料闪烁体的长度为 120 cm，截面大小为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 。4 层探测器分成两组，每组探测器的塑料闪烁体相互垂直排列，用于记录粒子的击中位置。每个塑料闪烁体中心安装有波长位移光纤，将产生的闪烁光导出至 SiPM (Silicon Photomultipliers) 上进行读出，数据存于本地测试机中，再通过 U 盘将数据转移出来，并送至 KEK 进行离线分析。Micromegas 探测器方案由四层层面积为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 的 Micromegas 探测器构成，实验并没有单独设计读出电子学，而是使用了为 Class12 Micromegas 顶点探测器而设计的读出电子学系统^[31]，探测器信号通过一款名为 DREAM^[32] 的专用读出芯片，进行放大和模拟采样，然后使用多通道 ADC (Analog-to-Digital Converter) 进行模数转换，最终通过以太网将数据传输至电脑^[33]。该实验成功地将缪子成像应用于考古研究中，然而由于装置面积和位置分辨率精度不够，成像时间长达数月，成像装置体积也较大。

1994 年，日本东京大学和理化学研究所 (RIKEN, Institute of Physical and Chemical Research) 联合开展了针对日本关东地区筑波山 (Mt. Tsukuba) 的成像实验^[34]。在当时的实验条件下，经过 800 小时的测试，成功地完成了筑波山最高峰和次高峰的成像。2003 年，日本理化研究所展开了对浅间山 (Mt. Asama) 的缪子成像实验，成功地完成了山体轮廓的重建。相较于筑波山成像实验，其通道数和测量精度都有了很大的提升^[35]。2014 年，巴黎环球物理学院等机构共同展开了针对苏弗里耶尔火山 (La Soufrière lava dome) 的测量。实验结果发现，待测山体的一个区域在实验期间有大量的物质减少，最终确认是由于对应部分的岩浆和热液变化所引起的^[36-37]。成功地验证缪子成像能够在数天内完成火山内部物质填充变化的检测，展示了缪子成像在活火山监控应用方面的能力。同一时期，法国两个小组还展开了针对多姆山 (Puy de Dôme) 的成像实验，该实验使用了塑料闪烁体和 GRPC 两种不同的探测器对山体进行测量，其中塑料闪烁体的成像结果如图 1.8 所示^[38-41]。

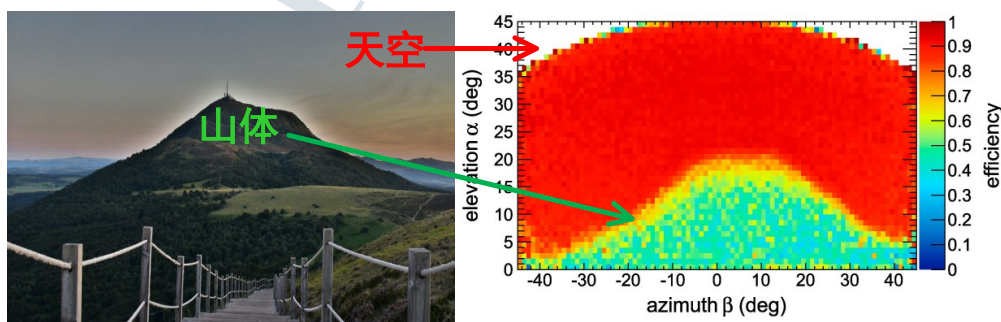


图 1.8 使用塑闪探测器对多姆山成像结果^[38]

此外, 宇宙线缪子还能应用到小型的人工建筑探测、地下矿藏探测、核反应堆监控等场合。如布雷西亚大学 (University of Brescia) 利用塑料闪烁体光纤和 SiPM (Silicon Photomultipliers), 对历史建筑物进行结构探测和稳定性监控^[42]。法国原子能和替代能源委员会利用面积为 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 的 Micromegas 对其研究所内的一座水塔进行成像, 成功地区分水塔水量是否蓄满的两种状态^[33]。

日本东京大学、日本高能加速器研究机构和美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory) 等研究机构利用塑料闪烁体探测器, 对福岛核电站内部结构进行了探测, 其结果如图 1.9 所示。通过缪子成像数据判断出核反应堆中已经没有大块的核燃料, 为后续处理工作提供了可视化数据^[43-47]。

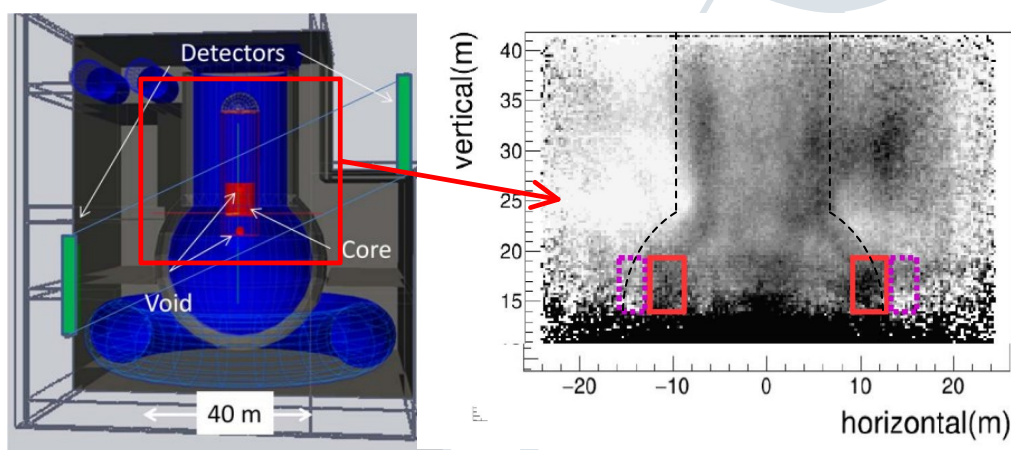


图 1.9 福岛核电站核反应堆成像结果^[45]

1.4.2 散射成像研究

2003 年, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory) 开发了第一台缪子散射成像原型机^[48]。一共使用了 8 层探测器, 每 2 层作为一组, 用于记录粒子的 X 和 Y 方向坐标。通过分析缪子的入射径迹和经过待测空间后的散射径迹, 得到空间三维成像。其实验结果如图 1.10 所示, 左图为实验得到的钨块和铁滑轨的成像结果, 右图为使用 Monte Carlo 方法模拟的结果。这个实验第一次成功地展示了缪子散射成像的应用前景。此外, 实验还提出了缪子散射成像的第一个算法 PoCA (Point of Closest Approach) 算法^[49]。

2009 年, 意大利布雷西亚大学和热那亚大学的 INFN (National Institute for Nuclear Physics) 团队利用 CERN 为 CMS (Compact Muon Solenoid) 实验研发的缪子桶部探测器 (Muon Barrel), 开展了缪子散射成像实验, 其实验装置和成像结果如图 1.11 所示。图 1.11(b) 中样品材料为铅, 厚度为 20 cm 。实验使用的探测器为漂移管, 图中每层探测器称为一个 “Super Layer (SL)”, 每个 Supper Layer 由四层漂移管交错排列构成。实验装置的上游探测器和下游探测器各由三个 Supper

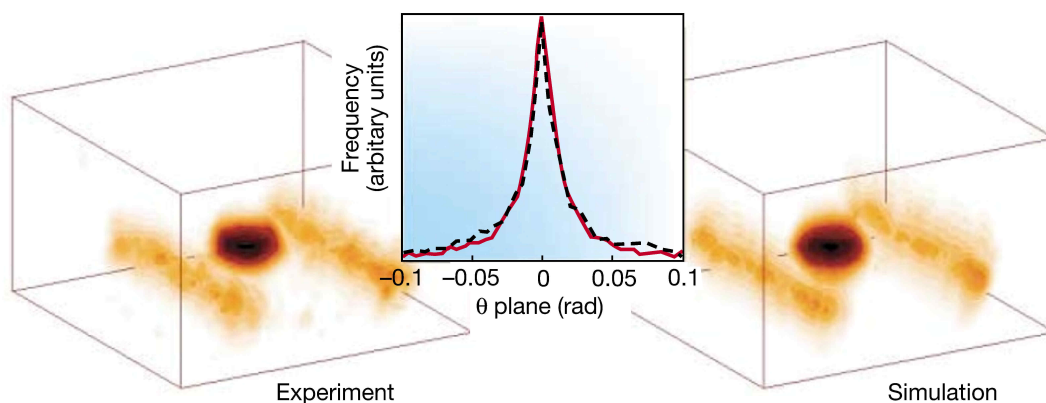
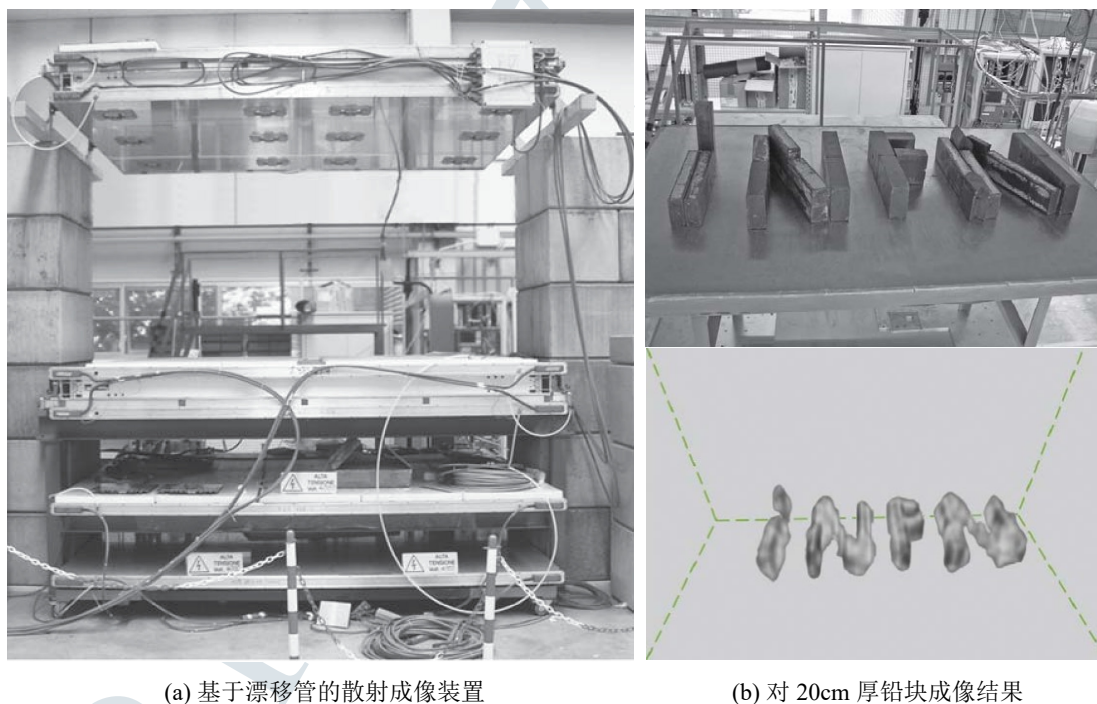


图 1.10 Los Alamos 试验结果。左图：实测成像结果，右图：仿真结果。实验待测物体是一个钨圆柱体（半径 5.5 cm，长 5.7 cm），放在一个尺寸为 35 cm × 60 cm × 1 cm 的塑料板上，最后整个塑料板再放在一个铁制滑轨上。图中钨和铁的滑轨能够被重建出来，塑料板由于原子序数较小，没有被重建^[48]

Layer 构成，在实验装置的最下方插入了两层额外的 Supper Layer 和两层已知厚度的铁，在将来的测试中，可以通过已知物质的散射角对缪子动量进行反推^[50]。然而，受限于探测器读出方式，该装置需要使用高精度时间测量芯片 HPTDC^[51]进行读出，系统结构复杂，不利于缪子成像实验开展。



(a) 基于漂移管的散射成像装置

(b) 对 20cm 厚铅块成像结果

图 1.11 INFN 团队使用的实验装置及其成像结果^[50]

2011 年，加拿大原子能有限公司 (AEC, Atomic Energy of Canada Limited) 开展了基于塑料闪烁体探测器的缪子散射成像装置研究^[52-53]，其实验装置如图 1.12(a)所示。利用该装置对 20 cm 厚的铅块进行成像，得到如图 1.12(b)所示

结果。实验表明,对于数十厘米尺度的物体,缪子成像可以将待测物质在空间中的分布完整地探测出来。然而,受限于成像装置的位置分辨率,得到该成像结果需要 15 小时。

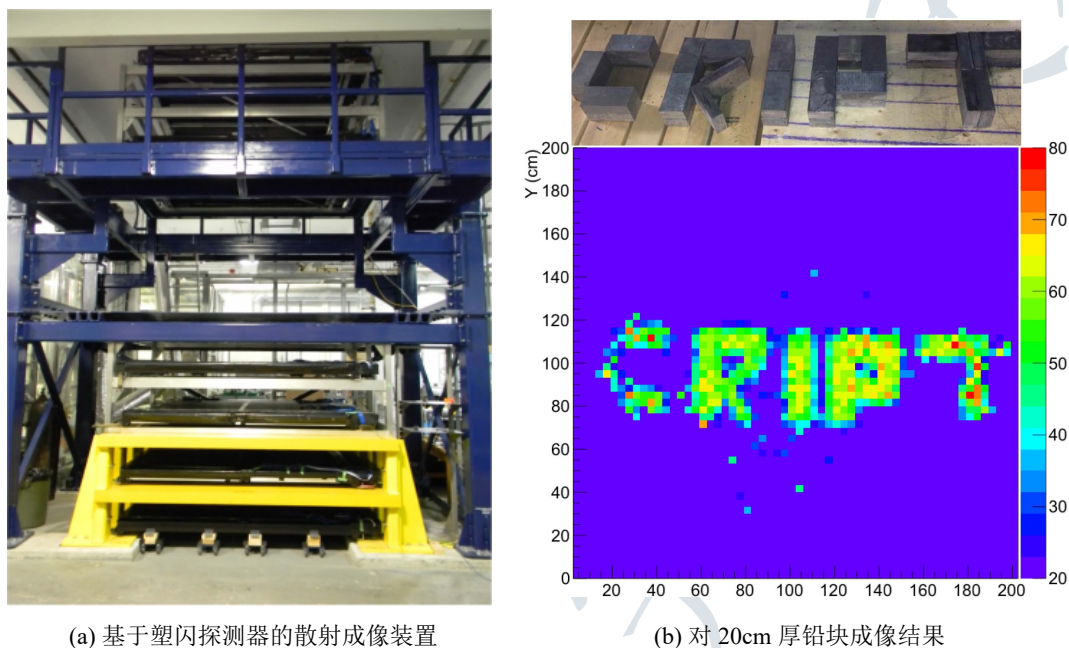
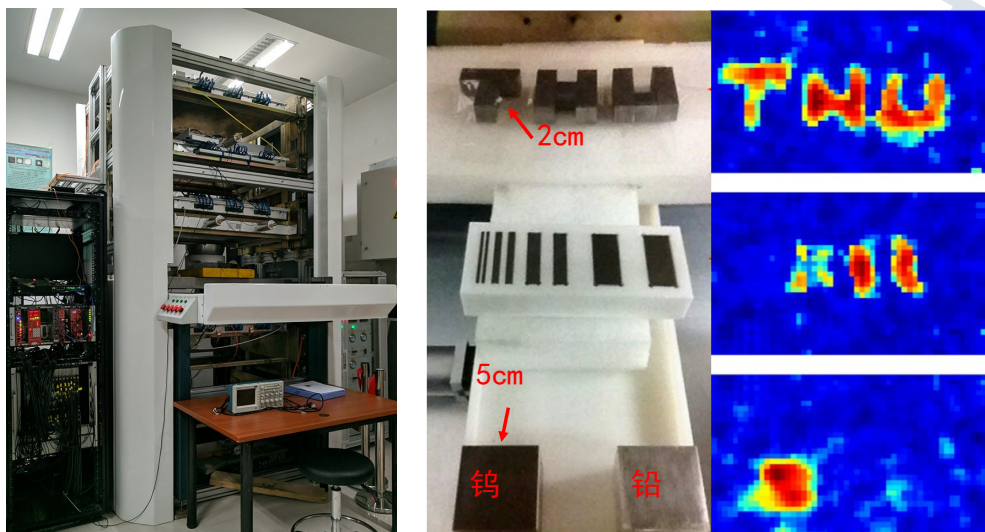


图 1.12 AEC 公司缪子成像装置及其成像结果^[52]

近年来,气体探测器也被应用到了缪子散射成像实验中。布里斯托大学(University of Bristol)的一个研究团队研制了基于 RPC (Resistive Plate Chamber) 探测器的缪子散射成像系统^[54],该装置能够区分十厘米尺寸的钨和铁。

在国内,清华大学也开展了基于 MRPC (Multi-gap Resistive Plate Chambers) 探测器的宇宙线成像装置和宇宙线成像径迹算法研究^[55-59]。实验装置和成像结果如图 1.13 所示,该装置探测面积为 $70\text{ cm} \times 70\text{ cm}$ 。由于位置分辨率原因,得到如下成像结果使用了 12 天。

在微结构气体探测器方面,佛罗里达理工学院(Florida Institute of Technology)基于 GEM (Gas Electron Multiplier) 探测器开展了相关的成像实验^[60],上游和下游各使用两层探测器对径迹进行测量。由于实验条件的限制,最终只使用了 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 的区域进行成像。相较于之前的实验,这个实验使用的样品尺度要小一个量级,进一步说明了缪子成像的精度可以达到厘米量级。然而,由于实验条件的原因,实验的时间较长。为了使得缪子成像更具有应用价值,使用更高精度的探测器将会进一步缩短成像时间,并提升成像质量。

图 1.13 基于 MRPC 的缪子成像系统及其成像结果^[59]

1.4.3 成像实验分析

经过几十年的发展，众多研究团队在考古、火山监控、地质测量、特殊材料检测等领域开展缪子成像研究。表1.1对近二十年来部分典型的缪子成像实验装置进行汇总，针对不同的应用需求，这些实验采用了不同的探测技术。

表 1.1 成像实验分析

实验名称/应用	探测手段	灵敏面积 (cm × cm)	读出通道数	位置分辨率
筑波山实验 ^[34]	塑料闪烁体	127 × 127	12	25 mm
浅间山实验 ^[35]	塑料闪烁体	100 × 100	40	cm 量级
苏弗里耶尔火山实验 ^[36]	塑料闪烁体	80 × 80	64	50 mm
多姆山实验 ^[40,61]	塑料闪烁体	100 × 100	256	2.5 mm
多姆山实验 ^[62]	GRPC	100 × 100	27648	4 mm
胡夫金字塔实验 ^[29]	核乳胶室	95 × 50	NA	1 μm
胡夫金字塔实验 ^[29]	塑料闪烁体	120 × 120	480	10 mm
胡夫金字塔实验 ^[29]	Micromegas	50 × 50	512	0.5 mm
Sacaly 水塔实验 ^[33]	Micromegas	50 × 50	512	0.5 mm
INFN 物质鉴别 ^[50]	漂移管	300 × 250	1598	0.2 mm
CRIPIT 物质鉴别 ^[63]	塑料闪烁体	200 × 200	1542	3.2 mm
清华大学散射成像实验 ^[55,64-65]	MRPC	70 × 70	360	0.6 mm
FSU 物质鉴别 ^[60]	GEM	5 × 5	512	0.13 mm

通过调研分析，可以得到如下的结论：

- 透射成像已经在考古、核反应堆探测等方面展现出实用价值，成为大尺度物质成像的研究热点；散射成像近年来发展迅速，尤其在重核物质检测方

面已展现出应用潜力。

- 成像装置在成像质量和成像所需时间方面还远远不能满足需求。透射成像实验通常需要数月的时间，使其难以和其他成像技术相比；散射成像需十几小时至几天的成像时间，并且还存在着成像清晰度不高的缺陷，限制了其在核安全检测领域的应用。

成像结果的质量受限于系统位置分辨率和面积，位置分辨率越高，成像质量将越好；有效面积越大，成像所需时间将越短。因此，如何完成高分辨、大面积的缪子成像系统，成为本领域的一大挑战。

近年来，微结构气体探测器研究取得了大量进展，尤其是 Micromegas 探测器，易于实现如 500 mm×500 mm 的大面积探测器，同时还可以通过拼接等方式实现更大面积的探测模块，适合用于缪子成像系统研究。当然，大面积 Micromegas 探测器会带来电子学通道成数量级增长的难题，对读出电子学系统提出了新的研究要求。

1.5 本论文的主要工作

宇宙线缪子成像对于核安全检测和大尺度物体无损成像，具有重大的意义。本文基于 Micromegas 探测器开展了高分辨缪子成像系统读出电子学研究，旨在研究出一套满足散射成像和透射成像的实验装置（根据项目组讨论，装置名为 μ STC——muon Scattering and Transmission imaging faCility）。基于该装置，本研究还将开展相应的散射和透射成像实验。

本论文的结构安排如下：

第一章，从粒子成像技术的本质和宇宙线缪子的性质出发，说明宇宙线成像的原理；并根据已有的实验，阐述宇宙线成像的重大意义与应用前景；同时分析缪子成像的最可行实现方式。

第二章，对宇宙线成像系统进行分析，从实验和物理仿真的角度，阐明宇宙线成像所需的分辨率和探测器面积；并基于系统指标和探测器信号特点，展开读出需求分析。

第三章，根据宇宙线缪子事例的特点，开展通道复用技术研究，并提出一套适合宇宙线成像的通道编码技术。

第四章，针对宇宙线成像系统需求，进行通用、可扩展读出电子学研究与设计，并完成读出电子学系统测试与验证。

第五章，基于高位置分辨率 Micromegas 探测器搭建多用途缪子成像样机，开展散射成像实验和透射成像实验，完成物体成像和建筑物成像验证。

第六章，总结与展望，探究缪子成像及读出电子学的发展方向。

参考文献

- [1] WILHELM CONRAD R. On a new kind of rays[J/OL]. *Nature*, 53(1369): 274-276[2020-12-05]. <https://www.nature.com/articles/053274b0>. DOI: 10.1038/053274b0.
- [2] LEWIS R A. Medical phase contrast x-ray imaging: current status and future prospects[J/OL]. *Physics in Medicine and Biology*, 49(16): 3573-3583[2021-01-13]. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/49/16/005>.
- [3] WRIGHT S I, NOWELL M M, DE KLOE R, et al. Electron imaging with an EBSD detector [J/OL]. *Ultramicroscopy*, 148: 132-145[2021-01-13]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304399114001946>. DOI: 10.1016/j.ultramic.2014.10.002.
- [4] KING N, ABLES E, ADAMS K, et al. An 800-MeV proton radiography facility for dynamic experiments[J/OL]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 424(1): 84-91[2020-01-02]. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900298012418>. DOI: 10.1016/S0168-9002(98)01241-8.
- [5] COLLINS-FEKETE C A, BROUSMICHE S, PORTILLO S K N, et al. A maximum likelihood method for high resolution proton radiography/proton CT[J/OL]. *Physics in Medicine & Biology*, 61(23): 8232[2020-12-07]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9155/61/23/8232/meta>.
- [6] KARDJLOV N, HILGER A, MANKE I, et al. New trends in neutron imaging[J/OL]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 605(1): 13-15[2021-01-13]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900209002150>. DOI: 10.1016/j.nima.2009.01.162.
- [7] BRACEWELL R N. Two-dimensional imaging[M]. Prentice Hall, 1995.
- [8] International Atomic Energy Agency. Incident and trafficking database (ITDB)[EB/OL]. (2019-04-02). <https://www.iaea.org/resources/databases/itdb>.
- [9] Main —AKADEMIK LOMONOSOV[EB/OL]. [2020-12-05]. <http://www.fnpp.info/>.
- [10] Pentagon awards contracts to design mobile nuclear reactor[EB/OL]. [2020-12-05]. <https://www.defensenews.com/smr/nuclear-arsenal/2020/03/09/pentagon-to-award-mobile-nuclear-reactor-contracts-this-week/>.
- [11] NRC: Design certification application - NuScale[EB/OL]. [2020-12-05]. <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/nuscale.html>.
- [12] 国务院新闻办公室网站. 《中国的核安全》白皮书[EB/OL]. (2019-09)[2021-04-30]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1663405/1663405.htm>.
- [13] ISSARD H. Radiation protection by shielding in packages for radioactive materials[M/OL]//

- SORENSEN K B. Safe and Secure Transport and Storage of Radioactive Materials. Oxford: Woodhead Publishing, 2015: 123-140[2021-02-02]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423096000095>. DOI: 10.1016/B978-1-78242-309-6.00009-5.
- [14] Global Volcanism Program • Department of Mineral Sciences • National Museum of Natural History. Global volcanism program | eruption search results[EB/OL]. [2020-12-06]. https://volcano.si.edu/database/search_eruption_results.cfm.
- [15] 王欢, 郝志新. 1750-2010 年强火山喷发事件的时空分布特征[J/OL]. 地理学报, 69(1): 134-140[2020-12-06]. <http://www.geog.com.cn/CN/abstract/abstract21924.shtml>. DOI: 10.11821/dlxb201401013.
- [16] Viktor F. Hess. Observation of the penetrating radiation on seven ballon flights[J/OL]. Physikalische Zeitschrift, 13: 1084-1091[2019-12-12]. http://www.ymambrini.com/My_World/MMJC17Nov14_files/Hess%20English.pdf.
- [17] J. Street, E. Stevenson. New evidence for the existence of a particle of mass intermediate between the proton and electron[J/OL]. Physical Review, 52(9): 1003-1004[2019-12-23]. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.52.1003>.
- [18] POWELL C F, RITSON D M. OBSERVATIONS WITH ELECTRON-SENSITIVE PLATES EXPOSED TO COSMIC RADIATION[J]. 163(4132): 5.
- [19] OLIVE K. Review of particle physics[J/OL]. Chinese Physics C, 40(10): 100001[2019-12-23]. <http://stacks.iop.org/1674-1137/40/i=10/a=100001?key=crossref.5ca5f9c166adc59f41e03a802b715c19>. DOI: 10.1088/1674-1137/40/10/100001.
- [20] MAURIN D, MELOT F, TAILLET R. CRDB: a database of charged cosmic rays[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 569: A32[2019-12-23]. <http://arxiv.org/abs/1302.5525>. DOI: 10.1051/0004-6361/201321344.
- [21] 汪晓莲, 李澄, 绍明, 等. 粒子探测技术[M]. 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [22] PROCUREUR S. Muon imaging: Principles, technologies and applications[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 878: 169-179[2019-11-25]. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900217308495>. DOI: 10.1016/j.nima.2017.08.004.
- [23] BETHE H A. Molière's theory of multiple scattering[J/OL]. Physical Review, 89(6): 1256-1266[2020-01-02]. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.89.1256>.
- [24] LYNCH G R, DAHL O I. Approximations to multiple coulomb scattering[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 58(1): 6-10[2020-01-02]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168583X9195671Y>. DOI: 10.1016/0168-583X(91)95671-Y.
- [25] BARRETT P H, BOLLINGER L M, COCCONI G, et al. Interpretation of cosmic-ray mea-

- surements far underground[J/OL]. *Reviews of Modern Physics*, 24(3): 133-178[2020-12-07]. <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.24.133>.
- [26] GEORGE, EP. Cosmic rays measure overburden of tunnel[J]. *Commonwealth Engineer*: 445-447.
- [27] L. W. Alvarez, ANDERSON J A, BEDWEI F E, et al. Search for hidden chambers in the pyramids[J/OL]. *Science*, 167(3919): 832-839[2019-12-17]. <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.167.3919.832>.
- [28] ScanPyramids[EB/OL]. [2021-01-19]. <http://www.scanpyramids.org/>.
- [29] MORISHIMA K, KUNO M, NISHIO A, et al. Discovery of a big void in khufu' s pyramid by observation of cosmic-ray muons[J/OL]. *Nature*, 552(7685): 386-390[2019-11-07]. <http://www.nature.com/articles/nature24647>. DOI: 10.1038/nature24647.
- [30] MORISHIMA K. Latest developments in nuclear emulsion technology[J/OL]. *Physics Procedia*, 80: 19-24[2021-01-21]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389215015990>. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.11.082.
- [31] ATTIE D, AUNE S, BARON P, et al. The readout system for the clas12 micromegas vertex tracker[C/OL]//2014 19th IEEE-NPSS Real Time Conference. 2014: 1-11. DOI: 10.1109/RT C.2014.7097517.
- [32] FLOUZAT C, BARON P, BESIN D, et al. Dream: a 64-channel front-end chip with analog trigger latency buffer for the micromegas tracker of the CLAS12 experiment[J]. 1.
- [33] BOUTEILLE S, ATTIE D, BARON P, et al. A micromegas-based telescope for muon tomography: The WatTo experiment[J/OL]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 834: 223-228 [2020-01-03]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216308166>. DOI: 10.1016/j.nima.2016.08.002.
- [34] NAGAMINE K, IWASAKI M, SHIMOMURA K, et al. Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction[J/OL]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 356(2): 585-595 [2020-12-18]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900294011699>. DOI: 10.1016/0168-9002(94)01169-9.
- [35] TANAKA H, NAGAMINE K, KAWAMURA N, et al. Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmic-ray muons to probe the internal structure of a volcano[J/OL]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 507(3): 657-669[2020-01-07]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890020301372X>. DOI: 10.1016/S016

- 8-9002(03)01372-X.
- [36] JOURDE K, GIBERT D, MARTEAU J, et al. Muon dynamic radiography of density changes induced by hydrothermal activity at the la soufrière of guadeloupe volcano[J/OL]. *Scientific Reports*, 6(1): 33406[2020-01-07]. <http://www.nature.com/articles/srep33406>. DOI: 10.1038/srep33406.
- [37] ROSAS-CARBAJAL M, JOURDE K, MARTEAU J, et al. Three-dimensional density structure of la soufrière de guadeloupe lava dome from simultaneous muon radiographies and gravity data[J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 44(13): 6743-6751[2021-01-22]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017GL074285>. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GL074285>.
- [38] AMBROSINO F, ANASTASIO A, BROSS A, et al. Joint measurement of the atmospheric muon flux through the puy de dôme volcano with plastic scintillators and resistive plate chambers detectors[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(11): 7290-7307 [2020-01-07]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015JB011969>.
- [39] BARNOUD A, CAYOL V, LELIÈVRE P G, et al. Robust bayesian joint inversion of gravimetric and muographic data for the density imaging of the puy de dôme volcano (france)[J/OL]. *Frontiers in Earth Science*, 8[2021-04-27]. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2020.575842/full>.
- [40] AMBROSI G, AMBROSINO F, BATTISTON R, et al. The MU-RAY project: Volcano radiography with cosmic-ray muons[J/OL]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 628(1): 120-123[2020-01-08]. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900210014890>. DOI: 10.1016/j.nima.2010.06.299.
- [41] PORTAL A, LABAZUY P, LÉNAT J F, et al. Inner structure of the puy de dôme volcano: cross-comparison of geophysical models (ERT, gravimetry, muon imaging)[J/OL]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2(1): 47-54[2020-01-07]. <https://www.geosci-instrum-method-data-syst.net/2/47/2013/>. DOI: 10.5194/gi-2-47-2013.
- [42] ZENONI A. Historical building stability monitoring by means of a cosmic ray tracking system[C/OL]//2015 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA). 2015: 1-8. DOI: 10.1109/ANIMMA.2015.7465542.
- [43] FUJII H, HARA K, HASHIMOTO S, et al. Performance of a remotely located muon radiography system to identify the inner structure of a nuclear plant[J/OL]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2013(73)[2021-01-22]. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptt046>.
- [44] FUJII H, HARA K, HAYASHI K, et al. Investigation of the unit-1 nuclear reactor of fukushima

- daiichi by cosmic muon radiography[J/OL]. Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2020(43)[2021-04-30]. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa027>.
- [45] FUJII H, HARA K, HASHIMOTO S, et al. Investigation of the status of unit 2 nuclear reactor of the fukushima daiichi by the cosmic muon radiography[J]. 16.
- [46] Los Alamos National Laboratory. IMAGING THE CORE OF FUKUSHIMA REACTOR WITH MUONS[EB/OL]. [2021-04-30]. https://www.lanl.gov/org/ddste/aldps/physics/_assets/docs/muon-tomography.pdf.
- [47] MIYADERA H, BOROZDIN K N, GREENE S J, et al. Imaging fukushima daiichi reactors with muons[J/OL]. AIP Advances, 3(5): 052133[2021-04-30]. <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4808210>.
- [48] BOROZDIN K N, HOGAN G E, MORRIS C, et al. Radiographic imaging with cosmic-ray muons[J/OL]. Nature, 422(6929): 277-277[2019-08-09]. <http://www.nature.com/articles/422277a>. DOI: 10.1038/422277a.
- [49] SCHULTZ L J, BOROZDIN K N, GOMEZ J J, et al. Image reconstruction and material z discrimination via cosmic ray muon radiography[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 519(3): 687-694[2020-01-19]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203028808>. DOI: 10.1016/j.nima.2003.11.035.
- [50] PESENTE S, VANINI S, BENETTONI M, et al. First results on material identification and imaging with a large-volume muon tomography prototype[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 604(3): 738-746[2020-01-02]. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900209004380>. DOI: 10.1016/j.nima.2009.03.017.
- [51] J. Christiansen. HPTDC high performance time to digital converter[M/OL]. CERN/EP - MIC, 2004[2021-03-14]. <https://cds.cern.ch/record/1067476/files/cer-002723234.pdf>.
- [52] ANGHEL V, ARMITAGE J, BOTTE J, et al. Construction, commissioning and first data from the CRIPT muon tomography project[C/OL]//2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC). 2012: 738-742. DOI: 10.1109/NSSMIC.2012.6551201.
- [53] ANGHEL V, ARMITAGE J, BOTTE J, et al. Prototype testing and algorithm development for the cosmic ray inspection and passive tomography (CRIPT) project[C/OL]//2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2011: 959-963. DOI: 10.1109/NSSMIC.2011.6154302.
- [54] BAESSO P, CUSSANS D, THOMAY C, et al. Toward a RPC-based muon tomography system for cargo containers.[J/OL]. Journal of Instrumentation, 9(10): C10041-C10041[2020-01-08].

- <http://stacks.iop.org/1748-0221/9/i=10/a=C10041?key=crossref.e66410fc1ad03c97d151cf26d1c7ecea>. DOI: 10.1088/1748-0221/9/10/C10041.
- [55] 叶瑾. 利用宇宙线对高 Z 物质进行成像的技术研究[EB/OL]. 清华大学(2009)[2020-04-12]. [http://new.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&dbname=CD FD0911&filename=2010214994.nh&uid=WEEvREcwSIJHSlDRa1FhcTdnTnhYaCt4MzR6SGZJT3VPUDIQVytJcUx1az0=\\$9A4hF_YAuvQ5obgVAqNKPCYcEjKensW4IQMovwHtwkF4VYPoHbKxJw!!&v=MTMxNzVUcldNMUZYQ1VSN3FmWStkdEZ5am1XN3ZLVjEyNkhyRzVHdGpGcTVFYlBJUjhlWDFMdXhZUzdEaDFUM3E=](http://new.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&dbname=CD FD0911&filename=2010214994.nh&uid=WEEvREcwSIJHSlDRa1FhcTdnTnhYaCt4MzR6SGZJT3VPUDIQVytJcUx1az0=$9A4hF_YAuvQ5obgVAqNKPCYcEjKensW4IQMovwHtwkF4VYPoHbKxJw!!&v=MTMxNzVUcldNMUZYQ1VSN3FmWStkdEZ5am1XN3ZLVjEyNkhyRzVHdGpGcTVFYlBJUjhlWDFMdXhZUzdEaDFUM3E=).
- [56] WANG X, CHENG J, WANG Y, et al. Design and construction of muon tomography facility based on MRPC detector for high-z materials detection[C/OL]//2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC). 2012: 83-85. DOI: 10.1109/NSSMIC.2012.6551065.
- [57] CHEN X L, WANG Y, CHEN G, et al. MRPC technology for muon tomography[J/OL]. Journal of Instrumentation, 15(12): C12001-C12001[2021-01-25]. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/12/c12001>. DOI: 10.1088/1748-0221/15/12/C12001.
- [58] 以恒冠, 程建平. 面向特殊对象的宇宙线缪子散射成像方法研究[Z]. 北京: 清华大学, 2015.
- [59] WANG X, ZENG M, ZENG Z, et al. The cosmic ray muon tomography facility based on large scale MRPC detectors[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 784: 390-393 [2021-04-27]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215000510>. DOI: 10.1016/j.nima.2015.01.024.
- [60] GNANVO K, GRASSO L V, HOHLMANN M, et al. Imaging of high-z material for nuclear contraband detection with a minimal prototype of a muon tomography station based on GEM detectors[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 652(1): 16-20 [2020-01-08]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900211002658>. DOI: 10.1016/j.nima.2011.01.163.
- [61] ANASTASIO A, AMBROSINO F, BASTA D, et al. The MU-RAY detector for muon radiography of volcanoes[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 732: 423-426 [2020-01-08]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213007705>. DOI: 10.1016/j.nima.2013.05.159.
- [62] CÂRLOGANU C, NIESS V, BÉNE S, et al. Towards a muon radiography of the puy de dôme [J/OL]. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 2(1): 55-60[2020-01-07].

- <https://www.geosci-instrum-method-data-syst.net/2/55/2013/>. DOI: 10.5194/gi-2-55-2013.
- [63] ANGHEL V, ARMITAGE J, BAIG F, et al. A plastic scintillator-based muon tomography system with an integrated muon spectrometer[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 798: 12-23[2020-12-07]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215008049>. DOI: 10.1016/j.nima.2015.06.054.
- [64] 程建平, 王学武, 曾志, 等. 大面积 MRPC 宇宙线缪子成像原型装置的研制[J/OL]. 核电子学与探测技术, 34(5): 613-617+645[2021-03-29]. <https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD2014&filename=HERE201405015&v=Yj9fWDUZgcxOuVsfGt4S1iLyLdpQWaNjF6CGsi2fH0gKn%25mmd2FlbegwIi4TN%25mmd2FoqSjFJL>.
- [65] PAN X Y, ZHENG Y F, ZENG Z, et al. Experimental validation of material discrimination ability of muon scattering tomography at the TUMUTY facility[J/OL]. Nuclear Science and Techniques, 30(8): 120[2021-04-27]. <https://doi.org/10.1007/s41365-019-0649-4>.

第2章 缪子成像系统分析

缪子成像目的在于更好地了解物质内部的结构与性质，成像结果清晰与否和成像时间长短是衡量缪子成像系统好坏的两个重要指标。直观看来，探测器位置分辨率越高，最终的成像质量越好，所需成像时间也更短。然而，更高的位置分辨率将给读出电子学带来更大的压力，也将增加系统的复杂度和成本。从应用的角度来看，合理的位置分辨率指标更利于缪子成像研究的开展和实现。本章将从实际应用角度出发，分析缪子成像系统需要的位置分辨率和面积指标，并据此提出对读出电子学的需求。

2.1 成像系统仿真与指标分析

从前文的调研可知，不同缪子成像系统的位置分辨率从几个厘米到几个微米不等；相较于透射成像实验，散射成像实验对位置分辨率的要求更高。下面将从仿真的角度对缪子成像系统所需的位置分辨率和面积进行仿真。

从相互作用角度分析，缪子成像的物理过程较为清晰，散射成像的主要相互作用是多次库仑散射，透射成像的主要相互作用是能量损失。对成像质量影响较大的因素是系统的位置分辨率指标，对应着不同的读出通道数和读出电子学方案。因此，本节将利用 CERN 开发的粒子物理仿真软件库 GEANT4^[1]，对缪子成像的过程进行仿真，验证不同位置分辨率对成像质量的影响。

GEANT4 是目前粒子物理领域应用最广泛的仿真软件库，ATLAS、CMS、ALICE 等大型实验都采用 GEANT4 作为方案验证工具。搭建仿真模型主要分为以下 4 个步骤：

1. 选择物理过程：缪子成像的主要过程是电离能损和多次库仑散射，因此在仿真中选择 QGSP_BERT^[2] 作为仿真的物理过程。
2. 定义入射粒子：选择劳伦斯利佛浦国家实验室 (LLNL, Lawrence Livermore National Laboratory) 开发的宇宙线簇射产生器 CRY (Cosmic-ray Shower Library)^[3] 作为缪子产生源。该软件包可以根据不同纬度、不同海拔和太阳活动周期，产生对应能量和角分布的宇宙线粒子。
3. 定义探测器结构：仿真采用 5 mm 厚的氩气作为灵敏层，这和实验最终使用探测器的漂移区厚度一致。
4. 粒子记录：将缪子击中探测器位置记录下来，用于径迹重建。

2.1.1 物质成像仿真

物质成像主要应用于一些特殊核材料探测,根据核安全检测领域的一份报告要求:核材料检测系统需要在10分钟内完成4千克的特殊核材料(SNM, Special Nuclear Material)检测,特殊核材料主要指的是钚、铀及其同位素材料^[4]。

因此,本研究选择4千克的铀材料作为目标材料,搭建的仿真模型结构如图2.1所示,图中待成像物体的厚度为10 cm,短边边长为5 cm^①。

成像系统的面积除了应覆盖待测物质以外,还应当考虑成像系统不同位置缪子接收率不同的影响。有研究结果显示,成像系统边缘的缪子通量仅为中心的10%~20%^[5]。为了使得成像结果不受接收度干扰,成像系统的面积至少需要1 m×1 m,故仿真结构中探测器面积设置为1 m²。考虑系统体积和易实现程度,探测器间距设置为10cm。

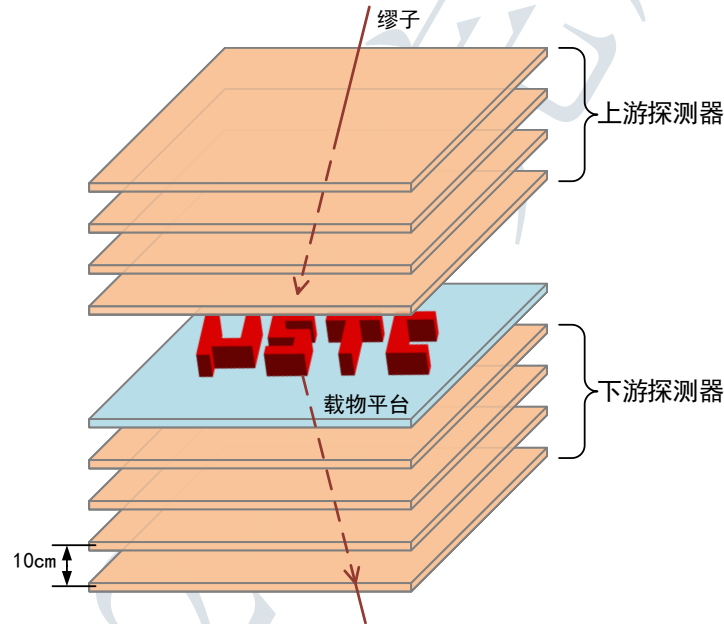


图 2.1 使用边长为 5 cm 的铀块搭建的成像仿真模型,其中红色的 μSTC 字样为待成像物体

在仿真中,使用 CRY 产生相当于 10 分钟照射量的缪子(海平面垂直方向的缪子通量约为 $1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ^[6]),利用目前成像速度最快的 PoCA 算法^[7]对仿真结果进行重建。

为了探究位置分辨率对成像结果的影响,在上、下游探测器所测结果中分别叠加不同的位置测量晃动,即 $x_{hit} = x_{real} + \Delta x$,其中 x_{real} 为真实击中位置, Δx 为随机晃动。使用 PoCA 算法进行对得到的径迹重建,由于叠加了击中位置不确定度,将会有部分重建点偏离待测物体位置,其重建散射角方差满足关系式

^①4 千克铀材料的体积约为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。

$\sigma^2(\theta_{rec}) = \sigma^2(\theta_{ideal}) + 2 \cdot \sigma^2(\Delta\theta)$, 其中 $\Delta\theta$ 为位置测量误差带来的径迹重建晃动。因此, 对事例进行筛选的阈值也将增大, 使得有效事例数减少。

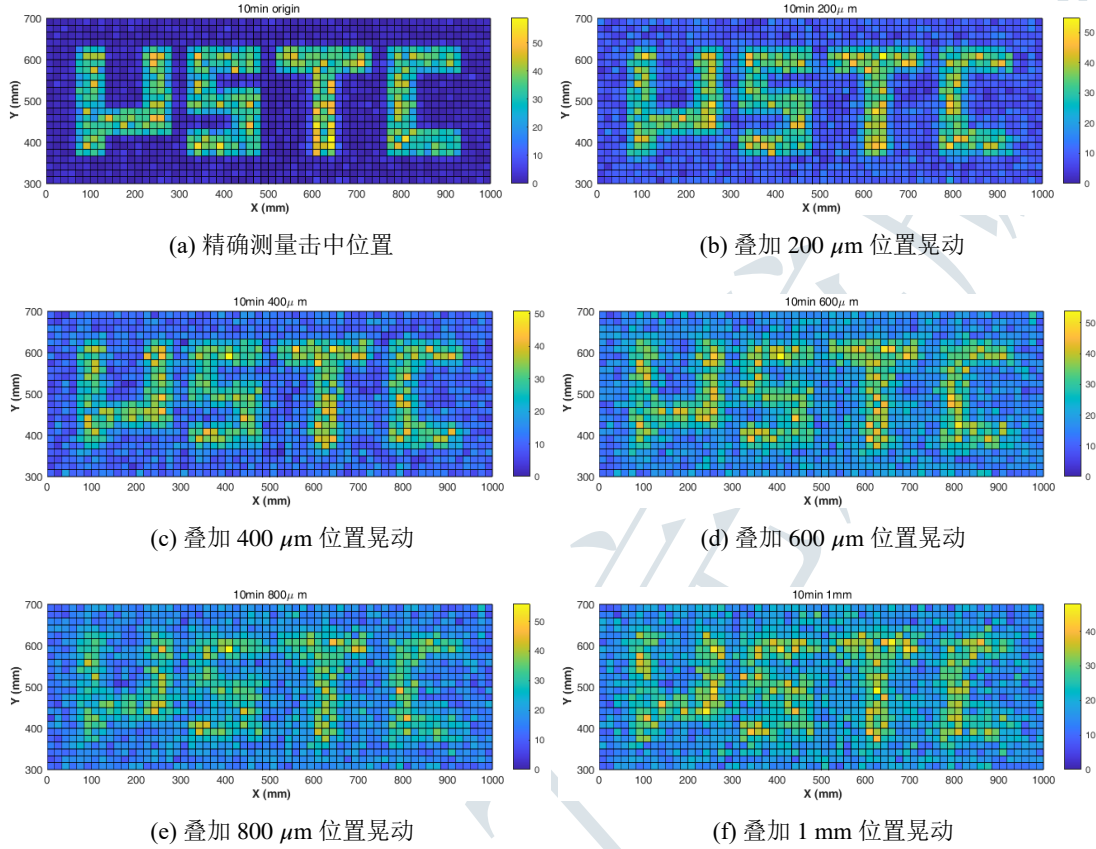


图 2.2 叠加不同位置测量晃动条件下, 利用 10 分钟缪子照射量对图 2.1 成像结果

不同位置分辨率条件下, 成像结果如图 2.2 所示。精确测量径迹时, 成像系统可以清晰地重建待测物质; 随着位置分辨率不断变差, 成像质量也不断变差。当位置分辨率为 1 mm 时, 重建图像边界模糊且出现大量噪点, 难以称之为成功成像。因此, 若要在 10 分钟完成千克量级的核材料成像, 系统的位置分辨率应当为百微米量级。位置分辨率越高, 越有利于提升系统清晰度。

2.1.2 物质鉴别仿真

缪子散射成像的另一个应用是进行物质鉴别, 利用缪子在不同物体中散射角分布统计结果不同, 可以实现物质区分。记缪子散射角在一对正交平面内的投影为 θ_x 和 θ_y , 则 θ_x 和 θ_y 等价, 其均值为 0。当物质厚度在 $10^{-3} \cdot X_0 \sim 10^2 \cdot X_0$ 范围内时, θ_x 和 θ_y 服从标准差为 $\sigma(\theta_0)$ 的正态分布。 $\sigma(\theta_0)$ 如第一章式 (1.7) 所示, 与材料的性质和入射粒子的性质相关。对 θ_x 进行归一化处理, 令 $\theta_{0x} = \theta_x / \sigma(\theta_0)$, 则 θ_{0x} 服从标准正态分布。设有 N 个缪子入射到待测样品上, 归一化散射角平方和定义为 X, 如式 (2.1) 所示。在不考虑缪子动量分布的前提下, X 服从自由度

为 $2N$ 的卡方分布^[8]。由于散射角的均值为 0，当 N 足够大时，散射角的样本方差如式 (2.2) 所示。令 $\lambda = X \cdot \sigma(\theta_0)/2N$ ， λ 可以化简为式 (2.3) 所示的结果，即 λ 为待测物质散射角的样本方差 $\sigma^2(\hat{\theta})$ 。因此，可以利用不同物质的散射角，结合卡方分布的性质，在一定的置信度的条件下对待测物质的成份进行检验。考虑宇宙线缪子动量分布后， X 不再服从卡方分布，其分布很难给出解析表达式，但是散射角标准差（或方差）依旧可以作为物质区分的判据。

$$X = \sum_{i=1}^N (\theta_{0xi}^2 + \theta_{0yi}^2) = \frac{\sum_{i=1}^N (\theta_{xi}^2 + \theta_{yi}^2)}{\sigma(\theta_0)} \quad (2.1)$$

$$\sigma(\hat{\theta}) = \frac{\sum_{i=1}^N (\theta_i - \bar{\theta})^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_i^2}{N} \quad (2.2)$$

$$\lambda = \frac{X \cdot \sigma(\theta_0)}{2N} = \frac{\sum_{i=1}^N (\theta_{xi}^2 + \theta_{yi}^2)}{2N} = \sigma^2(\hat{\theta}) \quad (2.3)$$

要达到可应用的程度，针对重核物质的检测系统需要在 2 分钟内检测出 4 千克的核材料，且误判率小于 5%^[4]。因此，以铀材料作为探测目标，将常见的核屏蔽材料铁和铅^[9] 作为区分目标，使用 2 分钟的缪子照射量对散射角标准差进行仿真。仿真模型如图 2.3 所示，仿真材料厚度均为 10 cm，质量为 4 千克。

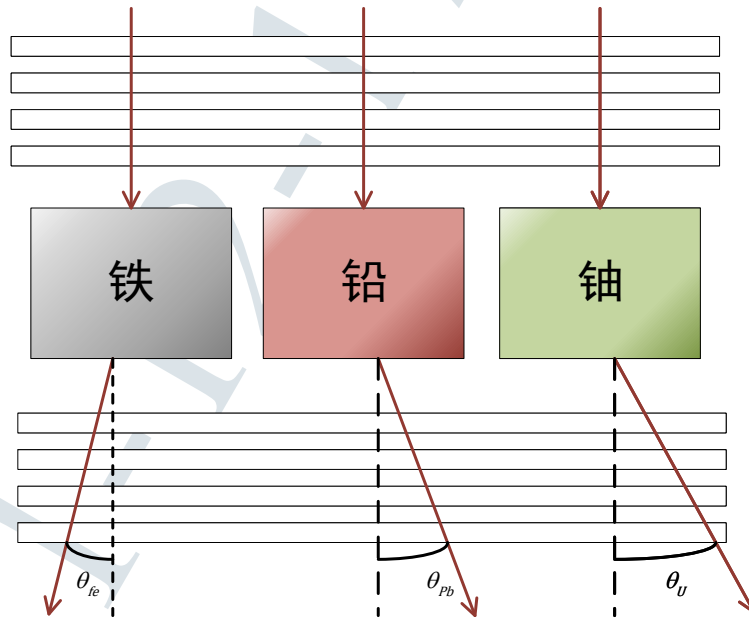


图 2.3 对铁、铅和铀三种材料进行物质鉴别仿真，材料厚度为 10cm，质量为 4 千克

根据式 (1.7) 以及铁、铅、铀三种物质的数据^[10]，在 3 GeV 缪子动量条件下，得到相关性质如表 2.1 所示，理想情况下，可以实现对三种物质的区分。在实际

应用中，由于缪子动量分布、位置测量晃动和统计涨落等因素影响，缪子散射角标准差统计值存在一定的分布宽度。因此，对图 2.3所示模型进行多次仿真，得到三种物质的散射角标准差分布，并在 95% 的置信度下计算铀材料的误判率。

表 2.1 X 铁、铅和铀的散射性质数据

材料	原子序数	辐射长度 (cm)	厚度 (cm)	σ_0 (mrad)
铁	26	1.757	10	11.53
铅	82	0.5612	10	21.23
铀	92	0.3166	10	28.82

不叠加位置重建晃动条件下，三种物质的散射角标准差分布如图 2.4所示。铁和铀之间的散射角标准差分布没有重叠，故可以完全区分；铅和铀之间的散射角标准差分布有少量重叠区域，通过统计，有 2.1% 的铀会被误判为铅。

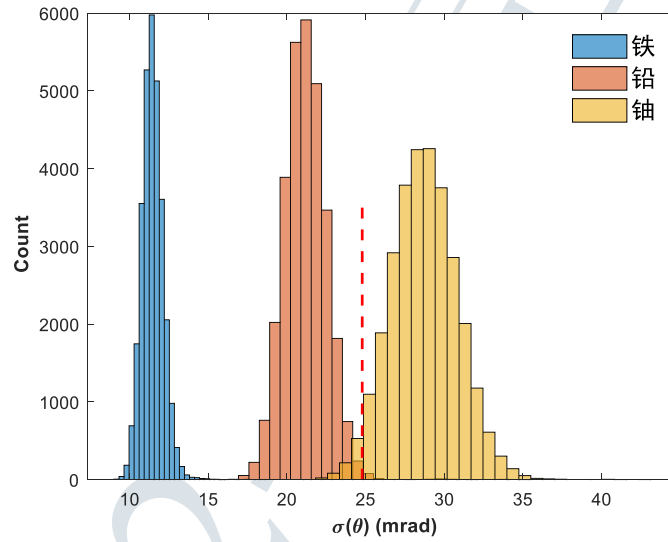


图 2.4 不叠加径迹晃动时，4 千克铀、铅和铁在 2 分钟缪子照射条件下得到的散射角标准差分布，图中虚线处为铅散射角标准差 95% 置信区间的上界。

当径迹测量有晃动时，径迹的晃动将对散射角的计算造成干扰。由于两个维度的散射角是相互独立的^[6]，以 X 维度为例，其散射角计算如式 (2.4) 所示。由于入射径迹的方向和出射径迹的方向相互独立，可得散射角的方差关系如式 (2.5) 所示，即径迹角度晃动的方差将线性叠加到散射角的方差中。

$$\theta_x = \theta_{\text{incidence}} - \theta_{\text{emergence}} \quad (2.4)$$

$$\sigma^2(\theta_x) = \sigma^2(\theta_0) + \sigma^2(\theta_{\text{incidence}}) + \sigma^2(\theta_{\text{emergence}}) \quad (2.5)$$

叠加 1 mm 位置重建晃动后，三种物质的散射角分布如图 2.5 所示，此时将铀误判为铅的比例为 4.6%，已经接近 5% 误判率的临界值。

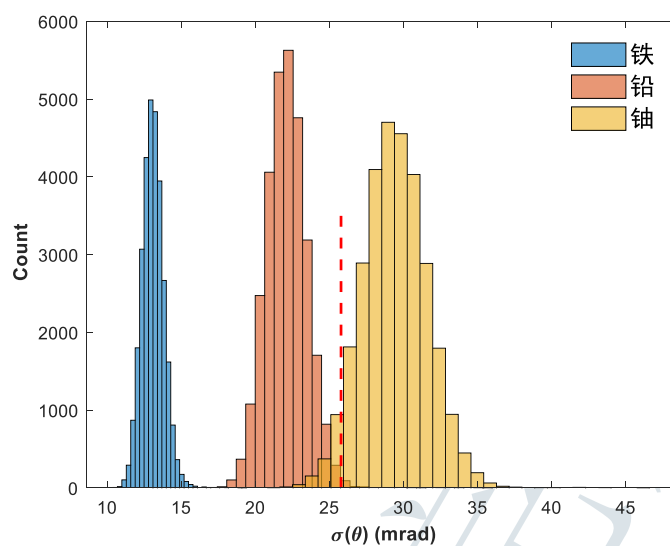


图 2.5 叠加 1 mm 径迹晃动时，4 千克铀、铅和铁在 2 分钟缪子照射条件下得到的散射角标准差分布。图中虚线处，铀散射角计数较图 2.4 更大。

探测器位置分辨率与误判率曲线如图 2.6 所示，若要在 2 分钟内实现铁、铅和铀的区分，成像系统的位置分辨率应当好于 1 mm。即满足成像实验所需位置分辨率的探测器，也能满足物质鉴别实验需求。

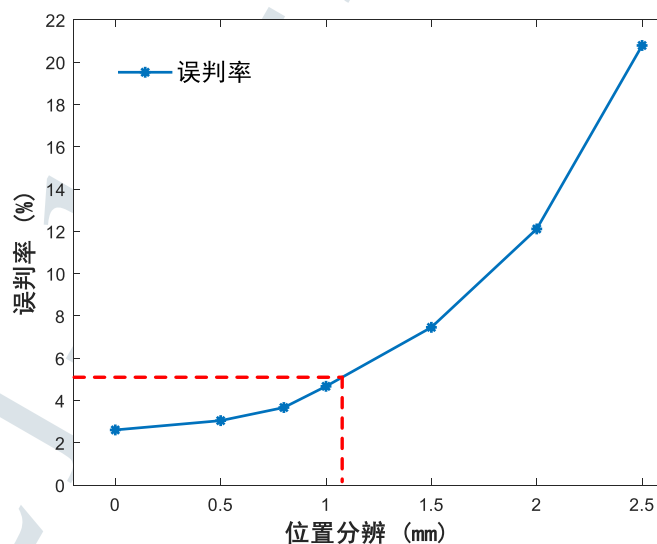


图 2.6 不同位置分辨率条件下，将铀误判为铅的比例

2.1.3 透射成像仿真

影响透射成像的主要因素是探测器面积，面积越大的成像系统能够在更短的时间内完成透射成像任务。透射成像系统对位置分辨率要求较散射成像更低，这也是表1.1中位置分辨率稍差探测器也可用于透射成像的原因。

针对透射成像实验，本研究搭建了如图 2.7所示的仿真模型^①。仿真使用的探测器面积为 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ ，倾角为 30° ；仿真目标为混凝土材料的建筑物，建筑物被分成了 $2 \times 6 \times 10$ 个房间（分别按照 XYZ 三个坐标方向排布），每个房间的长宽为 5 m ，高为 3 m ，墙厚 20 cm ；成像系统与建筑物距离为 50 m 。

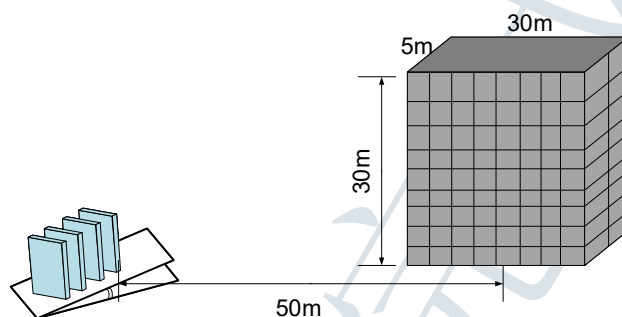


图 2.7 透射成像仿真模型，探测器面积为 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ ，倾角为 30°

在 24 小时的缪子通量条件下，所得成像结果如图 2.8所示，能够成功重建建筑物。按照面积比例关系，若使用面积为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的探测器，将能在 4 小时内完成建筑物成像。

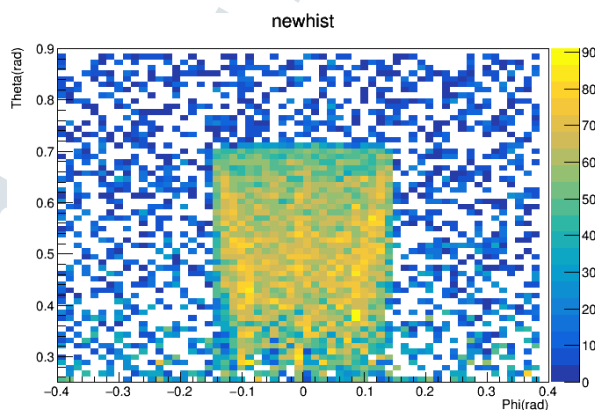


图 2.8 24 小时缪子通量条件下，透射成像仿真结果

^①透射成像仿真工作，是在散射成像代码基础上，与探测器组刘昱林共同完成，特此说明。

2.1.4 成像系统指标分析

根据上述仿真和分析结果，本论文提出了成像系统目标：透射成像系统需在10分钟内完成核材料检测与成像；散射成像系统需在数小时内完成对建筑物和山体的成像。为了实现该目标，成像系统需要满足如下指标：

- 探测面积：1 m × 1 m；
- 位置分辨率：百微米量级；
- 缪子事例重建效率：好于95%。

其中探测面积和位置分辨率指标通过选择合适的探测器实现，事例重建效率指标通过使用多层探测器实现。为了提高径迹探测器效率，散射成像装置使用8层探测器（上、下游径迹模块各4层），透射成像装置使用4层探测器^①。

2.2 Micromegas 探测器

近年来，微结构气体探测器发展迅速，其具有高位置分辨率、高增益、高探测效率、稳定性好、易于制作等优点，已经在诸如 COMPASS^[11]、CMS^[12]、ATLAS^[13]、PandaX III^[14] 等大型物理实验中得到应用。其中的 Micromegas 探测器具有易实现大面积覆盖、成本低等优势，有研究结果显示 Micromegas 探测器能达到 200 μm 以下的位置分辨率^[15] 和 1 m × 1 m 以上的有效面积^[16]，适合用于开展缪子成像研究。

2.2.1 Micromegas 探测器介绍

Micromegas 探测器主要由阳极读出条、阻性电极、微网电极、漂移电极和气室组成，其结构原理如图 2.9 所示^[15,17-18]。图中最底层为阳极读出板，上面刻蚀有读出条；读出条上方镀有一层高阻材料构成的阻性电极，在高阻材料上方均匀地放置绝缘支柱，支柱上方是微网层 (Micro-mesh)。微网层和阻性电极之间的间距一般为 25 μm ~ 150 μm ，称为雪崩放大区，均匀摆放的支柱保证了雪崩放大区的一致性。微网层上方为漂移电极，漂移电极和微网层之间的间距一般为 3 mm ~ 10 mm，这个区间称为漂移区^[19]。

漂移电极接负高压 HV1，微网层接负高压 HV2（数值上 $|\text{HV1}| > |\text{HV2}|$ ），阻性电极接地；在此工作电压下，漂移区的电场强度一般为几百 V/cm，雪崩放大区的电场强度可以达到 30 kV/cm 以上。除去丝网附近的区域，漂移区和雪崩区中的电场可以近似看作一个匀强电场；而在丝网附近靠近漂移区的一侧，电场线分布类似于漏斗形状，有助于收集漂移区电子，电子收集能力与漂移区和雪崩

^①以单层探测器效率为 95% 计算，4 层探测器中 3 层有击中信号即可重建径迹，则散射成像径迹重建率为 97.2%，透射成像装置的事例重建率为 98.6%。若仅使用三层探测器，则径迹重建率只有 85%。

区的电场比相关，其电场示意图如图 2.10 所示^[18-19]。

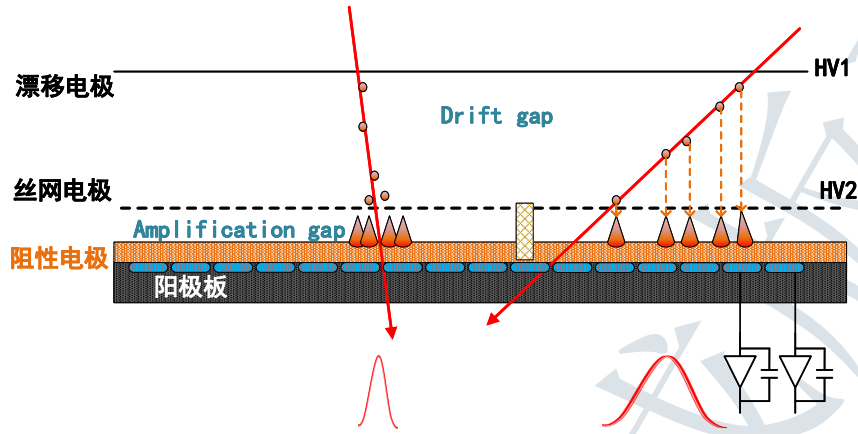


图 2.9 Micromegas 结构示意图

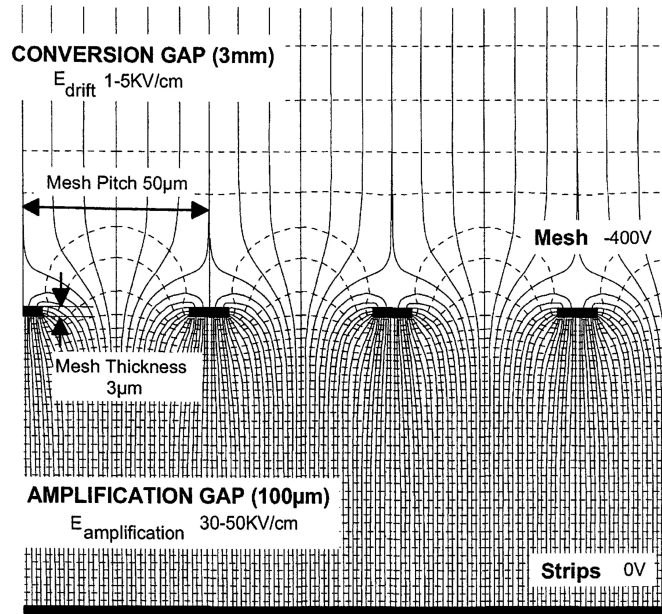


图 2.10 Micromegas 探测器内部电场示意图^[19]

当入射粒子进入探测器时，将在漂移区产生原初电离，原初电离产生的电子向下漂移至微网层并进入雪崩放大区。在强电场的作用下，原初电离的电子将被雪崩放大，产生大量的电子-离子对，电子向阳极条移动并很快被吸收，阳极条上感应出一个纳秒量级的快信号；阳离子则向丝网漂移，漂移时间为百纳秒量级，阳极条上感应出一个百纳秒宽度的负电荷脉冲信号。因此，阳极条上得到的信号由较快的电子信号和较慢的离子信号叠加而成，其信号波形如图 2.11 所示^[20]。

由于雪崩放大区的电场强度较大，Micromegas 探测器的增益约为 $10^4 \sim 10^6$ ，在实际应用中，通过调节漂移区和雪崩放大区的电场比，来对增益进行调节。以漂移区间隙为 5 mm、雪崩区间隙为 100 μm 的探测器为例，宇宙线缪子信号输出的电荷量在几个 fC 到几百个 fC 之间，信号脉宽约为 100 ns^[21]。

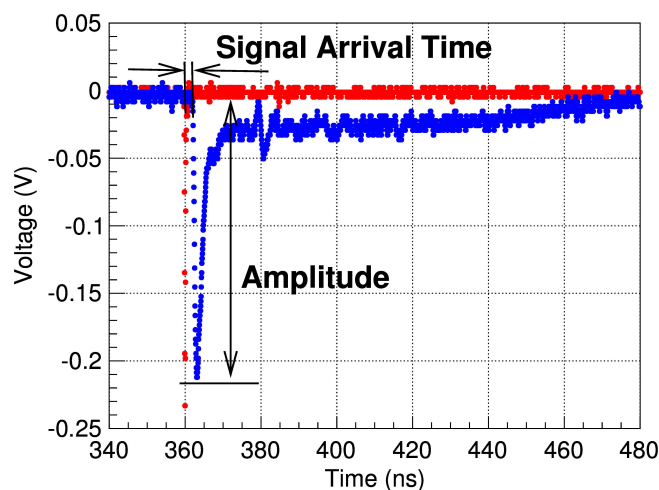
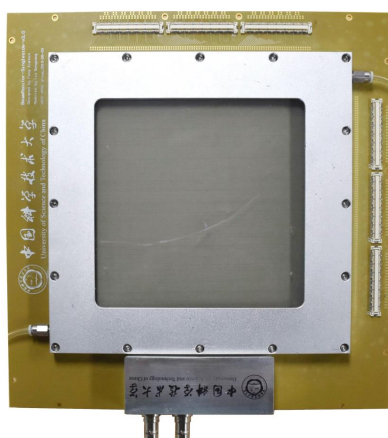


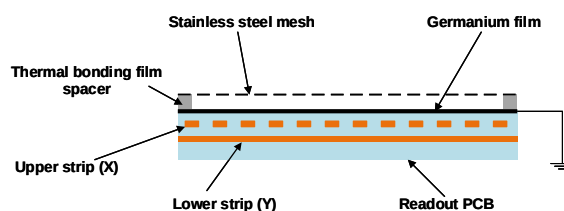
图 2.11 Micromegas 探测器阳极输出信号，其中蓝线为 Micromegas 探测器输出信号^[20]

2.2.2 基于热压膜工艺的 Micromegas 探测器

目前，国际上针对 Micromegas 探测器开展了众多研究。其中，中国科学技术大学核探测与核电子学国家重点实验室研制的 Micromegas 探测器，相较于传统刻蚀工艺的探测器，其拥有更好的位置分辨率、对环境友好、结构简单、易于扩展和大规模制作等特点^[22-23]，本研究基于该探测器展开。



(a) Micromegas 探测器



(b) 探测器侧视图和读出电极结构

图 2.12 基于热压膜工艺制作的 Micromegas 探测器^[22-23]

图 2.12(a)所示为制作完成的探测器照片，该探测器的面积为 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ ，同一个探测器可以完成 XY 两维读出。图 2.12(b)为探测器阳极板侧视图，阳极板上表面有一层铬材料构成的阻性电极，用于提供阳极地电位；在阻性电极下一层设计条宽较窄的读出条，中心距为 $400\text{ }\mu\text{m}$ ，条宽为 $80\text{ }\mu\text{m}$ ，将其定义为 X 轴方向；再下一层为条宽为 $320\text{ }\mu\text{m}$ 的读出条，其条中心距也是 $400\text{ }\mu\text{m}$ ，将其定义为 Y 轴方向。探测器的漂移区厚度为 5 mm ，雪崩放大区间隙为 $100\text{ }\mu\text{m}$ ，工作气

体使用氩气和二氧化碳混和气体 ($\text{Ar} : \text{CO}_2 = 93 : 7$)。当有入射粒子在漂移区产生电离时,雪崩放大的电子离子将同时在 X 轴和 Y 轴的读出条上产生感应信号,经过读出电子学处理后,将得到粒子的击中位置。

2.3 读出电子学需求

成像系统的目标是实现缪子径迹的精确测量,因此要求探测器准确测量缪子的击中位置。由于 Micromegas 探测器读出条宽较窄,缪子径迹引起的原初电离会分布在多根条上,常用的击中位置重建方法有电荷重心法^[24]和 Micro-TPC 方法^[25]。

在本研究中,采用电荷重心法作为位置重建的方法,其原理示意如图 2.13 所示,下图中横坐标为通道号,纵坐标为其感应电荷分布。缪子产生的电离信号会在击中中心附近多根条上产生不同的感应电荷,利用该电荷量进行位置重建的计算方法如式 (2.6) 所示,其中 x_i 为击中位置, Q_i 为电荷量 I_i 为修正项。

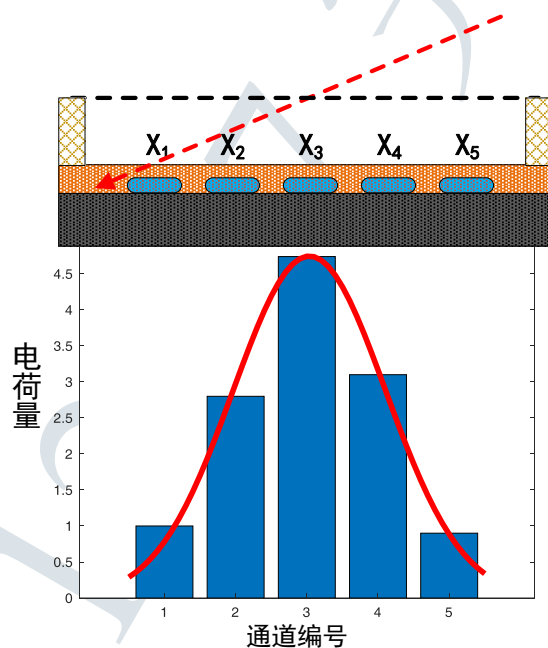


图 2.13 电荷重心法原理示意图

$$x_{\text{hit}} = \frac{(\sum x_i \cdot Q_i) I_i}{\sum Q_i} \quad (2.6)$$

因此,读出电子学的目标非常明确:记录缪子信号击中通道和精确测量该通道电荷量。为了实现这一看似简单的目标,电子学系统面临着诸多挑战,下面将对电子学系统的指标展开分析。

2.3.1 动态范围和噪声分析

电子学动态范围要能覆盖缪子沉积能量产生的电荷范围,通过仿真,自然动量和角分布的缪子在 5 mm 氩气中沉积能量如图 2.14所示。其 95% 能量沉积范围为 0.2 keV ~ 3.5 keV,以探测器增益 10^4 计算,则宇宙线缪子产生的总电荷量为 $12\text{ fC} \sim 190\text{ fC}$ 。原初电离通常会分布在相邻的 2 ~ 5 根探测器条上,故单个电子学通道动态范围为 $2.4\text{ fC} \sim 95\text{ fC}$ 。

在进行触发和事例筛选时,为了有效区分事例和噪声,应当满足 $3 \cdot \sigma_{\text{noise}} < 2.4\text{ fC}$,其中 σ_{noise} 为噪声分布的标准差,即前端电子学的噪声需小于 0.8 fC 。

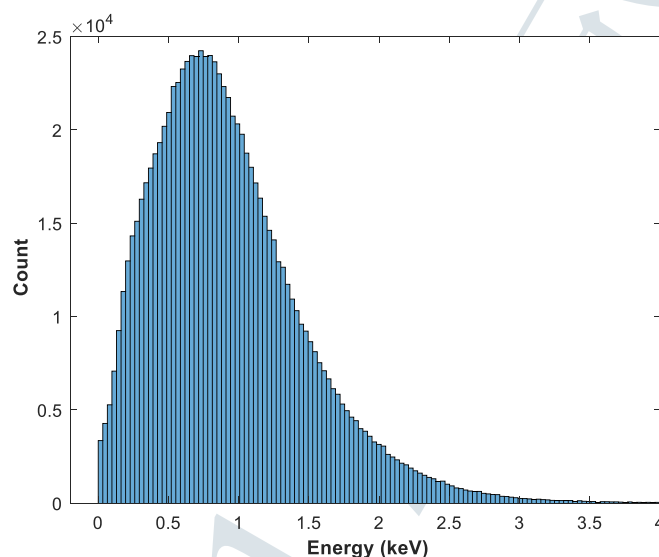


图 2.14 自然动量和角分布缪子在 5 mm 氩气中沉积能量分布

2.3.2 读出系统体量分析

由前文分析可知,透射成像装置需 4 层探测器,散射成像装置需 8 层探测器。在一些应用场合中,为了对缪子的动量信息进行测量,还需要再增加 4 层探测器。即在宇宙线缪子成像的应用中,探测器的层数范围为 4 ~ 12 层。

目前使用的探测器条间距为 $400\text{ }\mu\text{m}$,面积为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。采用 XY 二维条读出方案,单层读出通道数为 5000 路,成像系统总通道数为 20000 ~ 60000 路。

2.3.3 触发系统需求分析

触发系统的作用是在大量的击中信息中,排除噪声干扰并筛选出有效的击中事例。目前,缪子成像实验有两种触发模式:外触发和自触发。外触发方式是利用塑料闪烁体作为符合探测器,向数据获取系统和前端电子学提供触发信号;

自触发工作方式是利用多个前端电子学提供的击中信息，若有符合触发条件的事例，后端电子学则向前端电子学发送触发信号，并将数据读回。

在缪子成像的应用中，外触发的方式能够更准确地筛选出有效事例，但是需要额外的符合探测器。自触发的工作方式不需要额外的探测器，但是需要更复杂的触发逻辑和算法，适用于外场实验等紧凑型设计的实验场合。因此，触发系统设计需要兼容自触发和外触发两种工作方式。

2.3.4 需求小结

综上所述，针对高分辨缪子成像系统的读出电子学需求总结如下：

1. 动态范围： $2.4\text{ fC} \sim 95\text{ fC}$ ；
2. 电子学噪声：小于 0.8 fC ；
3. 总通道数：20000 ~ 60000 路；
4. 后端电子学具有可扩展性和通用性，能适应不同的应用场景和成像方式；
5. 满足自触发和外触发两种工作模式。

为了减少信号传输和数字电路对探测器信号的干扰，实现对宇宙线缪子信号的精确测量，将读出电子学分为前端电子学和后端电子学，前端电子学将信号放大并数字化后传输至后端电子学，由后端电子学对数据进行进一步处理与存储。基于此，本研究提出的缪子成像系统读出电子学方案如图 2.15 所示。

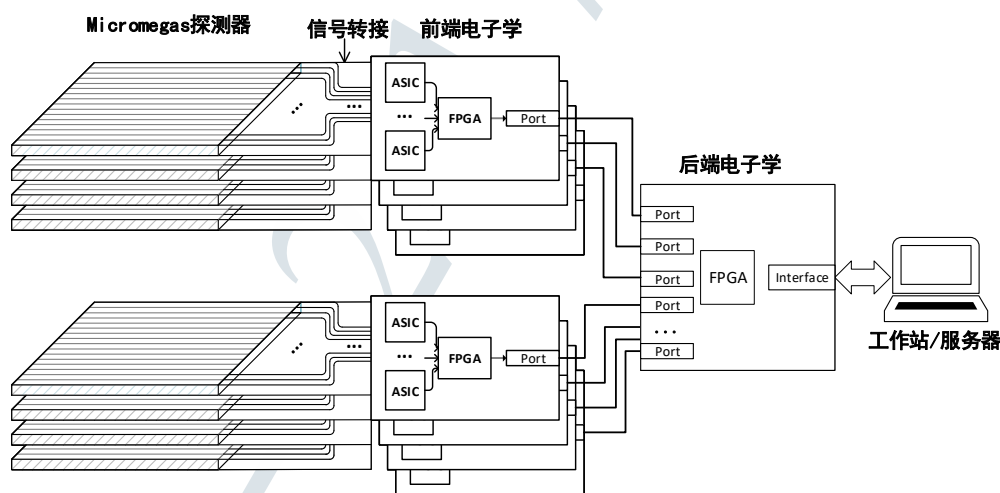


图 2.15 读出电子学系统方案示意图

2.4 本章小结

本章针对缪子成像应用的难点与挑战，通过 GEANT4 仿真得到缪子散射成像实验、物质区分实验和透射成像实现所需要的各项指标。并基于仿真结果，提

出了缪子成像系统的具体研究目标。

Micromegas 探测器是实现缪子成像系统的较好选项, 本章基于 Micromegas 探测器信号特征和宇宙线缪子事例特点, 提出了缪子成像系统读出电子学需求。

然而, 要满足高分辨、大面积缪子成像系统的读出需求, 还面临着两个挑战: 海量的读出通道数和复杂的读出系统。缪子成像系统的读出通道数为 20000 ~ 60000 路, 其通道数相当于一台小型谱仪的体量, 带来的系统功耗、成本和复杂度将难以接受, 这是目前缪子成像系统发展的瓶颈之一。面对不同的成像场合和成像应用, 缪子成像系统的层数和面积各不相同, 因此要求读出电子学需具有较强的可扩展性和通用性。

本文接下来的内容针对这两项挑战提出相应的解决方案。

参考文献

- [1] ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, et al. Geant4 developments and applications [J/OL]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 53(1): 270-278[2020-10-24]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/1610988/>. DOI: 10.1109/TNS.2006.869826.
- [2] Reference physics lists | geant4.web.cern.ch[EB/OL]. [2021-03-01]. <https://geant4.web.cern.ch/node/155>.
- [3] HAGMANN C, LANGE D, WRIGHT D. Cosmic-ray shower generator (CRY) for monte carlo transport codes[C/OL][2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record: volume 2. 2007: 1143-1146. DOI: 10.1109/NSSMIC.2007.4437209.
- [4] OFFICE D N D. Broad agency announcement no BAA12-101[Z]. 2012.
- [5] HOHLMANN M, FORD P, GNANVO K, et al. GEANT4 simulation of a cosmic ray muon tomography system with micro-pattern gas detectors for the detection of high-z materials[J/OL]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 56(3): 1356-1363. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5076040>. DOI: 10.1109/TNS.2009.2016197.
- [6] OLIVE K. Review of particle physics[J/OL]. Chinese Physics C, 40(10): 100001[2019-12-23]. <http://stacks.iop.org/1674-1137/40/i=10/a=100001?key=crossref.5ca5f9c166adc59f41e03a802b715c19>. DOI: 10.1088/1674-1137/40/10/100001.
- [7] SCHULTZ L J, BOROZDIN K N, GOMEZ J J, et al. Image reconstruction and material z discrimination via cosmic ray muon radiography[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 519(3): 687-694[2020-01-19]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203028808>. DOI: 10.1016/j.nima.2003.11.035.
- [8] 陈希孺. 陈希孺文集 ISBN: 9787312018381: 概率论与数理统计[M/OL]. 中国科

- 学技术大学出版社, 2009[2021-03-02]. <https://book.douban.com/subject/2201479/>.
- [9] ISSARD H. Radiation protection by shielding in packages for radioactive materials[M/OL]// SORENSON K B. Safe and Secure Transport and Storage of Radioactive Materials. Oxford: Woodhead Publishing, 2015: 123-140[2021-02-02]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423096000095>. DOI: 10.1016/B978-1-78242-309-6.00009-5.
- [10] AtomicNuclearProperties[EB/OL]. [2021-03-03]. <https://pdg.lbl.gov/2020/AtomicNuclearProperties/>.
- [11] ABBON P, ALBRECHT E, ALEXAKHIN V Y, et al. The COMPASS experiment at CERN[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 577(3): 455-518[2021-05-20]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900207005001>. DOI: 10.1016/j.nima.2007.03.026.
- [12] COLLABORATION T C, CHATRCHYAN S, HMAYAKYAN G, et al. The CMS experiment at the CERN LHC[J/OL]. Journal of Instrumentation, , 3(8): S08004-S08004[2021-03-14]. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08004>. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
- [13] COLLABORATION T A, AAD G, ABAT E, et al. The ATLAS experiment at the CERN large hadron collider[J/OL]. Journal of Instrumentation, , 3(8): S08003-S08003[2021-05-20]. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08003>. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08003.
- [14] CHEN X, FU C, GALAN J, et al. PandaX-III: Searching for neutrinoless double beta decay with high pressure ^{136}Xe gas time projection chambers[J/OL]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 60(6): 061011[2021-05-20]. <https://doi.org/10.1007/s11433-017-9028-0>.
- [15] IODICE M. Performance studies of MicroMegas for the ATLAS experiment[J/OL]. Journal of Instrumentation, 9(1): C01017-C01017[2020-07-15]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/9/01/C01017>.
- [16] WOTSCHACK J. The development of large-area micromegas detectors for the atlas upgrade [J/OL]. Modern Physics Letters A, 28(13): 1340020[2021-05-20]. <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0217732313400208>.
- [17] GIOMATARIS Y, REBOURGEARD P, ROBERT J P, et al. MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 376(1): 29-35[2020-12-04]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900296001751>. DOI: 10.1016/0168-9002(96)00175-1.
- [18] 汪晓莲, 李澄, 绍明, 等. 粒子探测技术[M]. 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [19] GIOMATARIS Y. Development and prospects of the new gaseous detector “micromegas”

- [J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 419(2): 239-250[2021-03-01]. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900298008651>. DOI: 10.1016/S0168-9002(98)00865-1.
- [20] BORTFELDT J, BRUNBAUER F, DAVID C, et al. PICOSEC: Charged particle timing at sub-25 picosecond precision with a micromegas based detector[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 903: 317-325[2021-03-01]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218305369>. DOI: 10.1016/j.nima.2018.04.033.
- [21] 李金. 蓬勃发展的位置灵敏气体探测器[J/OL]. 核电子学与探测技术(1): 70-75[2021-03-01]. <https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD2001&filename=HERE200101021&v=iZCXZnGL43Pk%25mmd2F884Wkr%25mmd2FHd2UoGfceS3u3%25mmd2BQkFBW%25mmd2BL05cibAtbsGpdlNonCbhyqop>.
- [22] 张志永. 面向宇宙射线 μ 子成像应用的大面积 Micromegas 探测器的研制[EB/OL]. 南华大学(2018-10). <http://cicpi.ustc.edu.cn/indico/contributionListDisplay.py?confId=1288>.
- [23] FENG J, ZHANG Z, LIU J, et al. A thermal bonding method for manufacturing micromegas detectors[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment: 164958[2020-12-21]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900220313553>. DOI: 10.1016/j.nima.2020.164958.
- [24] 李澄, 汪兆民, 陈宏芳, 等. 多丝正比室阴极感应电荷重心读出定位性能的研究[J/OL]. 高能物理与核物理, 12(4)[2021-05-20]. <https://inspirehep.net/files/f125272d67c9823e4b9d136bd60dbc69>.
- [25] MAYET F, GUILLAUDIN O, GRIGNON C, et al. Micromegas micro-TPC for direct dark matter search with MIMAC[J/OL]. Journal of Physics: Conference Series, 179: 012011[2020-07-15]. <http://arxiv.org/abs/0905.4654>. DOI: 10.1088/1742-6596/179/1/012011.

第3章 读出通道压缩方案研究

在缪子成像实验中，面对数万量级的探测器通道数，如果能通过一些技术手段将需要的读出通道数目压缩，同时不损失有效信息，将会极大的简化缪子成像系统，对读出电子学研究具有重大意义。

本章将从宇宙线缪子信号的特点入手，分析通道压缩的可能性和可选方案，并给出相应的数学模型和最终的实现方案。

3.1 通道压缩方案分析

3.1.1 读出通道压缩需求分析

对于 Micromegas 探测器，常用的读出方式是将每个阳极读出条连接至一路读出电子学，称为直接读出方案。由前文分析可知，若采用直接读出方案，意味着将需要大量的读出电子学通道数，相应读出系统体量也将非常庞大，给读出系统的设计带来极大的挑战。此外，系统复杂度、功耗、成本等方面也极大地增加，不利于缪子成像应用的研究和发展。

然而，每个宇宙线缪子只会击中探测器的一个区域，产生的原初电离分布在击中位置中心附近的几根读出条上，每个事例仅需要记录少量的信息即可。此外，海平面附近垂直方向的宇宙线事例率约为 $1 \text{ min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ^[1]，单位时间内只有少量的缪子击中探测器。

从信息量的角度分析，宇宙线缪子事例在时间和空间上分布都较为稀疏，直接读出方案中存在大量的冗余通道和冗余信息。因此，在宇宙线缪子成像应用中，可以采取合理的手段和技术对读出信息进行压缩，在不损失宇宙线缪子信息的前提下尽可能地减少系统复杂度。针对宇宙线缪子事例在空间和时间上稀疏的两个特点，可以从两个层面上进行压缩，一是对读出通道数目的压缩，尽可能减少读出通道数，提高前端读出电子学集成度；二是对读出数据进行压缩，尽可能地排除无效信息。本章接下来的内容将介绍读出通道数目压缩的方案，读出数据压缩内容将在第四章读出电子学部分进行研究和分析。

3.1.2 通道压缩技术及其对比

在不降低事例率和位置分辨率的前提下，如何尽可能提高探测器读出通道数目的压缩比例，一直以来都是国内外研究的热点。目前延迟线读出、阵列型阻性阳极读出、像素读出和位置编码读出等方法，已经成功应用于气体探测器读出研究，下文将对其进行分析和对比。

1. 延迟线读出方法

延迟线读出方法最早应用于多丝室^[2], 利用信号在延迟线中传输的时间差, 对击中位置进行重建。在延迟线读出中, 将固定延迟单元插入相邻的探测器读出条之间, 并将探测器通道和所对应的延迟单元一端连接起来, 在探测器两端使用 TDC (Time-to-Digital Converter) 测量探测器脉冲信号到来的时间, 通过信号到达两端的时间差来确定击中位置。2 个电子学通道即可完成探测器一个维度读出, 通达压缩比极高。在 2003 年, G. Guedes 等人将其应用于微结构气体探测器的读出, 实现了 100 μm 的位置分辨率^[3]。

然而, 延迟线读出方法的死时间随着探测器面积增大而增加。当探测器面积增大后, 缪子计数率增加, 采用该方法很难满足成像读出需求; 此外, 延迟线需要高精度的时间测量系统和性能一致的延迟单元, 不利于缪子成像系统后续研究的开展。

2. 阵列型阻性阳极读出方法

阻性电极读出法是将阳极板划分成较大的正方形读出单元, 每个单元平面内部覆盖高阻性材料, 边界由低阻材料构成, 单元的四角为读出电极。由于其内部不同位置到四个读出电极的电阻值和电容值不同, 因此雪崩产生的电子云团向四个读出电极分配的电荷量不同, 利用电荷分配信息可以对粒子入射位置进行重建^[4-6]。

阻性阳极读出方法所需电子学通道数较少、死时间小, 但是其存在枕形失真等不利因素, 难以获得较高的位置分辨率; 同时需要对探测器进行大量改造, 不利于成像系统的研究。

3. 像素读出方法

像素读出法利用额外的门控信号, 实现了二维读出向一维读出压缩。使用电容阵列, 将每个读出单元的感应电荷分别存储在一个电容上, 每一行的电容共用一个读出电子学通道, 电容和读出电子学通道之间使用薄膜场效应管 (TFT, Thin-Film Transistor) 开关进行隔离, 每列开关共用一个门控信号。读出时, 在门控信号驱动下 TFT 开关逐一选通闭合, 将电容上的电荷送到读出电子学通道中进行采样^[7-8]。

像素读出法集成度较高, 能获得较好的位置分辨率, 但是其需要特殊的 CMOS (Complementary Metal - Oxide - Semiconductor) 工艺, 成本较高, 不具有通用性, 难以大面积推广。

4. 位置编码读出方法

位置编码读出是使用特殊的编码规则, 建立起探测器读出电极和电子学读出通道间的映射关系。一个读出电子学通道对应多个探测器通道, 实现少量电子学通道对大量探测器通道的读出。根据电子学读回的通道信息和编码规则, 可

以反演出击中的探测器通道，位置编码读出方案可分为感应编码读出和直接编码读出。有多个研究小组分别针对微通道板 (Micro-channel Plate)、Micromegas 探测和 GEM 探测器开展了感应编码读出研究^[9-11]，验证了感应编码读出的可行性。法国原子能科学院和中国科学技术大学的研究团队，分别提出了两种不同的直接编码读出方案，验证了直接编码读出在大面积探测器应用的前景^[11-13]。

在不损失有效信息的前提下，位置编码方法对读出通道数目进行压缩。其中，直接读出编码方案可以独立于探测器设计，便于开展大面积探测器读出的研究。当然，由于较多的读出电极并联，使得探测器电容增大，会增加一定的噪声。

针对宇宙线成像，读出方法应当满足不损失位置分辨率、易实现、便于迭代升级等要求。因此，位置编码读出方法是最具有可行性的方案。而直接编码读出方案无工艺要求，不需要对探测器进行改造，可以和探测器分立设计，利于系统的研究和开发，同时也能保证系统的稳定性。

3.2 编码读出方案研究

3.2.1 编码读出研究进展

目前，位置编码读出方法有三种实现思路。第一种是法国原子能和替代能源委员会下属的 Saclay 研究中心 (Centre de Saclay) 提出的基于双面读出探测器的编码方案^[12]。其原理如图 3.1 所示，图中 PCB (Printed Circuit Board) 为双面读出 Micromegas 探测器的阳极读出板，其上下表面都有气室和相应的读出条。上表面为 m 个条宽较大的读出条，位置测量精度较差；下表面为 $m \times n$ 个条宽较窄的读出条，用于测量粒子的精确位置。上表面每个宽读出条都对应有 n 个下表面的窄读出条，即将下表面读出电子学分为 m 组。通过特殊的分组和 PCB 设计，使得下表面的每个读出通道在对应分组中出现且仅出现一次。在读出过程中，上表面使用 m 个电子学通道进行读出，即直接读出；下表面读出条共使用 n 个电子学通道进行编码读出，保证读出电子学在每组内不重复使用。

当有宇宙线缪子穿过探测器时，上下气室都会发生电离，并且会在相应的雪崩放大区产生电荷信号。上、下表面的读出电子学会分别记录读出通道号，上表面的读出通道可以唯一地确定击中位置，即粒子击中的“粗位置”；同一分组内，下表面的读出条也可以唯一确定击中位置，即粒子的“细位置”。因此，使用 $m + n$ 个电子学通道即可完成 $m \times n$ 个探测器通道的读出；当 $m = n$ 时，达到最大通道压缩比 $(m + n)/4$ 。如使用 64 个读出电子学通道 ($m = n = 32$)，即可完成对 1024 路探测器信号读出。这样的实现方式要求对探测器做较大的改造，等效于使用两个探测器完成一个维度信号的读出。若要记录缪子的击中位置，则需要 2 个双面 Micromegas 探测器（等效于 4 个 Micromegas），系统复杂度增加 4 倍。

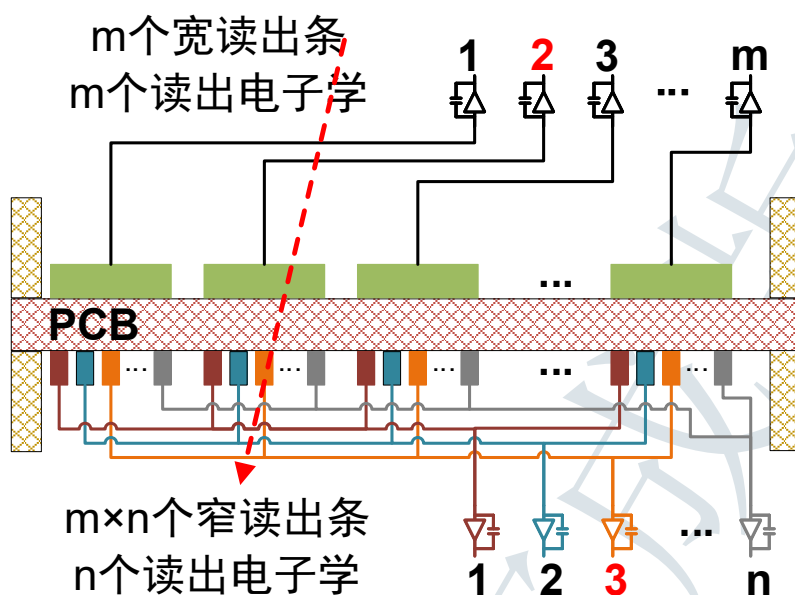


图 3.1 基于双面读出探测器编码方案原理示意图

第二种实现思路是电荷感应编码，在每个阳极板 PCB 读出条的下一层，设计两个大小不同的感应条。当探测器产生电荷信号后，阳极条上的电荷量将会按照面积比例在感应条上感应出电荷。在编码时保证感应条大小关系不重复，通过分析电子学读回的通道编号和电荷幅度关系，可以反演出击中的探测器条编号。

电荷感应编码原理如图 3.2 所示，通过 3 个电子学通道完成对 6 个探测器通道的读出。如读出通道 1 和读出通道 3 收集到感应信号，且 $Q_{ch1} < Q_{ch3}$ 时，根据面积关系可以反推出击中的探测器通道为 3 号。2011 年，中科院兰州近代物理研究所在 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的 Micromegas 探测器上验证了这项技术的可行性^[10]。

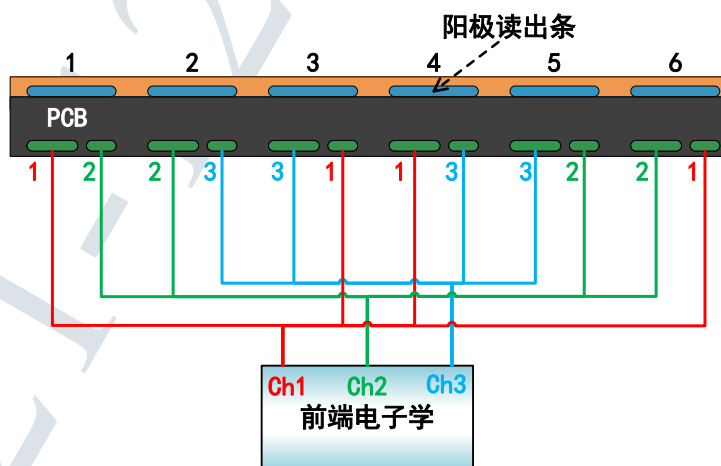


图 3.2 电荷感应编码原理示意图

感应编码需要对阳极板 PCB 进行特殊设计，若要记录缪子击中位置，则需要两个探测器正交排列。在 $400\ \mu\text{m}$ 的探测器条间距条件下，感应条的生产过程对 PCB 制作工艺要求较高。对于读出条宽较小的探测器，雪崩后的电子会分布在相邻的多个条上，造成解码困难。

第三种实现方案是直接编码读出方案，该方案将读出电子学通道与多个探测器通道直接相连。选取一个合适的组合方式，使得一对连续的探测器通道唯一地映射到一对电子学通道上。对于条间距较小的探测器，感应信号会分布在相邻的多个阳极读出条上，即每次事例一定会在多个连续的探测器条上产生电荷信号，根据通道击中的连续性，即可反演出对应的探测器通道。

直接编码读出原理如图 3.3 所示，图中使用 5 个电子学通道完成 11 个探测器通道读出。比如，前端电子学读回击中通道为 1、4 和 5，则可能的探测器击中通道为 1、4、5、6、8、10、11，根据通道连续性和通道数量对应关系，可以得到真实的击中位置为 4、5 和 6 三个探测器通道。中国科学技术大学和 Saclay 研究中心分别开展了相应的直接编码读出方案研究，并分别证明了使用 $2n + 1$ 个电子学通道最多可以读出 $[n \cdot (2n + 1) + 1]$ 个探测器通道^[11-12]。直接编码读出方案可以使编码电路独立于探测器阳极读出板设计，减少读出电子学和探测器设计的耦合，有利于保证系统的稳定性，便于实验方案快速升级迭代。

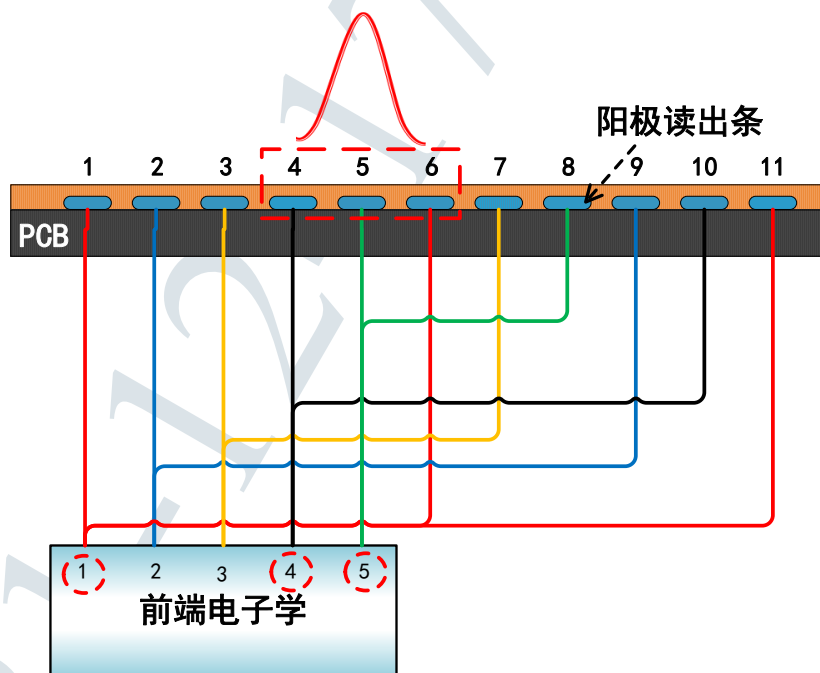


图 3.3 直接编码读出原理示意图

三种编码读出方案中，双面读出编码方案和感应编码方案都需要对探测器阳极板进行特殊设计，在一定程度上增加了系统设计的复杂度；在这两种方案

中, 由于编码电路和探测器感应读出条在同一区域, 一个探测器只能测量一个维度的击中信息。若要完成 XY 两个维度击中位置测量, 探测器数目需要增加一倍, 增加了系统的实现难度和成本。

而直接编码读出方案可以不对探测器阳极区域进行特殊改造, 便于方案研究和实现。同时, 在同一个探测器上可以实现两个维度的阳极条编码读出, 不需要额外增加探测器数目, 利于粒子位置的准确测量。

因此, 本论文基于直接编码读出方案开展研究。

3.2.2 直接编码读出方案的数学原理

1. 编码规则

直接编码方案的应用前提是: 在单次事例中, 探测器有两个及以上的读出条产生感应信号。如本研究采用的探测器读出条间距为 $400\ \mu\text{m}$, 雪崩产生的电离信号至少会在两个连续的读出条上产生感应信号^①, 满足直接编码读出方案的要求。根据一定规则, 对探测器通道进行编码, 将大量的冗余通道信息压缩; 在解码过程中, 利用探测器击中通道连续性这一额外信息, 还原出唯一的探测器击中通道组合。

直接编码读出方案可以归纳为建立探测器通道与电子学通道的映射, 该映射需要满足如下三条规则:

1. 每对连续的探测器通道都唯一地映射到一对无序的电子学通道上;
2. 一对无序电子学通道只能唯一对应一对探测器通道;
3. 一个探测器通道只能连接到一个电子学通道上, 而一个电子学通道要连接多个探测器通道。

第一条规则保证了每个探测器通道都能被遍历, 第二条规则保证了解码的唯一性, 第三条规则保证了探测器通道编码唯一性和电子学通道复用。据此可以建立两个集合 A 和 B , 集合 A 为所有相邻探测器通道号的组合, 设探测器通道数为 m , 则集合 $A = \{12, 23, 34, \dots, (m-1)m\}$, 集合 A 的元素个数为 $(m-1)$ 个。集合 B 为所有电子学通道的无序组合, 设电子学通道数为 n , 则集合 $B = \{12, 13, \dots, 1n, 23, \dots, 2n, \dots, (n-1)n\}$, 集合 B 的元素个数为 C_n^2 个, 如图 3.4 所示。任何满足三条规则的集合 A 到集合 B 的单射, 都可以作为一条编码规则。

2. 数学模型

从图论角度出发, 可以将编码过程表示为建立编码图的过程^②。将读出电子学通道号表示为平面上的顶点, 从其中一个顶点出发, 设置一个计数, 每经过一

^① 在一些成像应用场合中, 雪崩产生的信号分布在多个探测器条上, 会导致成像结果出现“虚像”现象。在本研究中, 正是利用这一特性实现读出通道压缩, 同时利用电荷重心法消除由于电荷分布带来的影响。

^② 图是由一系列顶点和边构成的集合, 详见《Graph theory》^[14]。

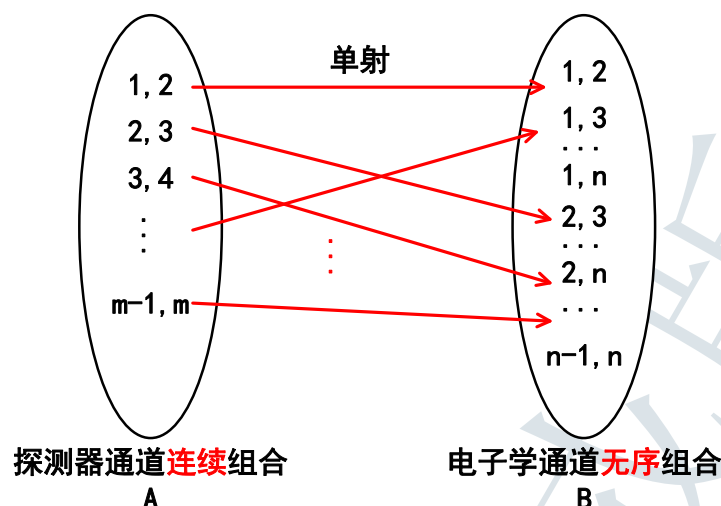


图 3.4 编码映射规则示意图

个顶点后计数加 1，该计数值作为顶点对应的探测器通道号，即该电子学通道应读出的探测器通道。任何一条不经过重复边的路径，都构成一个编码方案。

以图 3.3 所示编码方式进行说明，其对应的编码图如图 3.5 所示，图中黑色顶点为电子学通道编号，带圆圈数字 (① ~ ⑪) 为探测器通道。在该方案中，探测器通道 ① ~ ⑤ 直接对应电子学通道 1 ~ 5，即从黑色顶点 1 出发，按 1 → 2 → 3 → 4 → 5 的顺序依次画一条线。探测器通道 ⑥ 对应电子学通道 1，故顶点 5 和顶点 1 之间有一条连线。以此类推，继续按照 5 → 1 → 3 → 5 → 2 → 4 → 1 的路径完成该编码图。

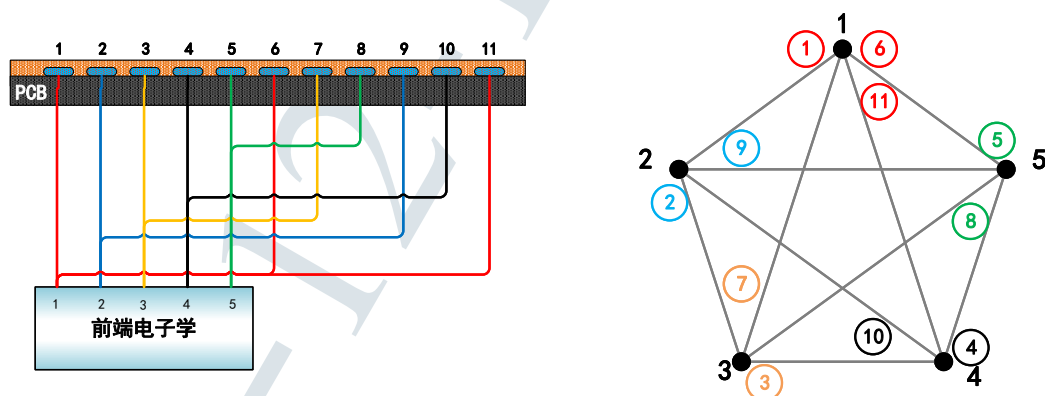


图 3.5 图 3.3 所示编码方式对应的编码图

画一条路径，使其不经过重复边，则每条边对应的探测器通道号一定是连续的，且都唯一对应一对顶点，即一对连续探测器通道唯一对应一对无序的电子学通道；同时，每两个顶点之间只有一条边，即一对的电子学通道唯一对应一对连续的探测器通道；由于每个顶点可能会被经过多次，计数递增保证了每个探测器

通道只能对应一个电子学通道，而单个电子学通道可以对应多个探测器通道。

上述过程构造的路径满足前文叙述的三条编码规则，即可作为一个编码方案。7个读出电子学通道对15个探测器通道的读出方案编码图如图3.6所示，按照 $7 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ 的顺序遍历各个顶点，得到集合 $A = \{1-2, 2-3, 3-4, \dots, 14-15\}$ ，集合 $B' = \{7-1, 1-2, 2-6, 6-3, 3-5, 5-4, 4-7, 7-3, 3-4, 4-2, 2-5, 5-1, 1-6, 6-7\}$ 。集合 B' 为集合 B 的子集。换言之，在给定7个读出电子学通道的条件下，还可能读出更多的探测器通道，下文将对 n 个电子学通道最大读出探测器通道数目进行分析。

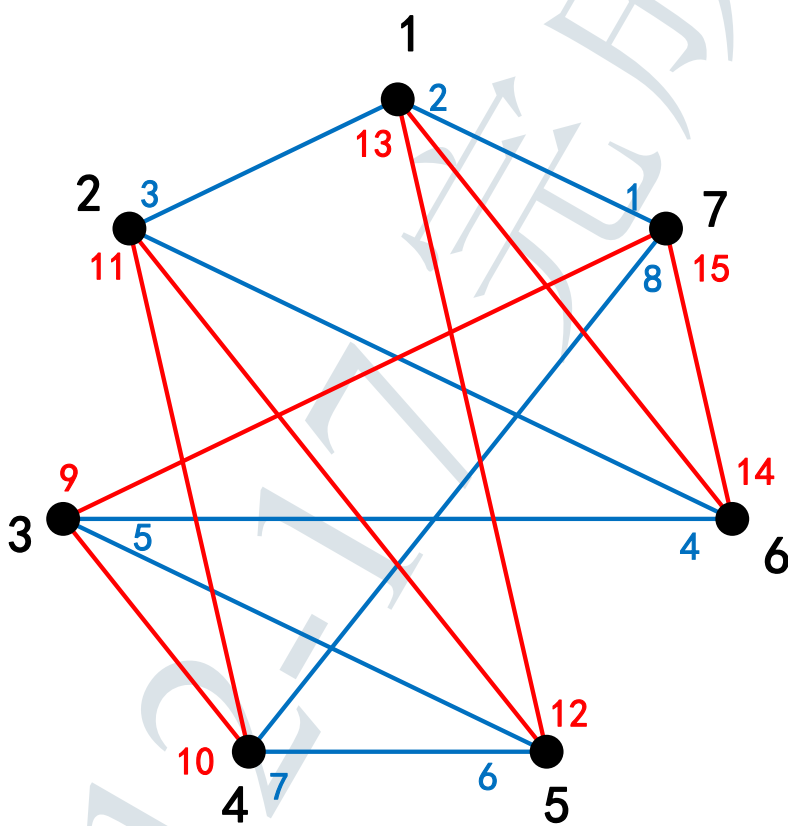


图 3.6 编码方案和图的对应关系

上述编码过程可以使用图论中的欧拉路径问题进行描述，即从一个顶点出发，构造一条从顶点 v_i 到 v_j 且经过重复边的路径 W ，当 $v_i = v_j$ 时， W 即为欧拉回路^[14]。在所有的欧拉路径中，最大路径的长度为编码方案能读出的最大通道数，此时编码问题转换为欧拉路径问题。某个顶点被经过的次数，为该顶点对应电子学通道复用的次数。

为了求得 n 个读出电子学通道最大能读出探测器通道数，将命题改写为：平面上有 n 个顶点，构造一个欧拉图 G ，使得图 G 各顶点的度之和最大（简单图所

包含边的数目等于各顶点度之和除以2)。当 n 为奇数时, 构造一个完全图 G_{odd} , 则图 G_{odd} 为欧拉图, 此时任何一条欧拉行迹 (trace) 均可作为一套编码方案, 记最大读出探测器通道数为 m , 则 $m - 1 = C_n^2$, 即最大可以读出 $(C_n^2 + 1)$ 个探测器通道。当 n 为偶数时, 若构造完全图 G_{even} , 则 G_{even} 的每个顶点都是奇次项, G_{even} 不是欧拉图。需要将图 G_{even} 的一些边去掉, 构造一个欧拉图 G'_{even} , 使得 G'_{even} 的度达到最大值。构造过程中, 每去掉一条边就有 2 个奇次项变为 2 个偶次项, 当去掉 $(n - 2) / 2$ 个边后, 剩下两个奇次项时, 成功构造出欧拉图 G'_{even} , 此时最大能读出的探测器通道数为 $(C_n^2 - (n - 2) / 2 + 1)$ 个。

由前文可知, 欧拉图的一条欧拉回路可以构成一套编码方案。对于一个欧拉图, 其欧拉回路有多种构建方式, 即存在多种编码方案。2013 年 Saclay 实验室类比于基因编码案提出了一套编码方案, 该方案没有提出一套通用的编解码思路, 只能针对特定的实验开展研究^[12], 本文将不对其开展分析和研究。

3.2.3 现有的编码读出方案

2015 年, 本文作者所在实验室研究出一套直接编码读出方案^[11,13], 该编码方案有具体的编码和解码公式, 并且具有一定的可扩展性。其编码表如表3.1所示, 表中大号黑色字体数值为读出电子学通道号, 红色下标数值为探测器通道号。比如当电子学通道 4、5、7 三个通道有信号时, 可以唯一地确定击中探测器 17、18 和 19 通道。

表 3.1 现有编码方案编码表^[13]

row	list of encoded multiplexing connections
1	$1_1, 2_2, 3_3$
2	$1_4, 4_5, 2_6, 5_7, 3_8, 4_9, 5_{10}$
3	$1_{11}, 6_{12}, 2_{13}, 7_{14}, 3_{15}, 6_{16}, 4_{17}, 7_{18}, 5_{19}, 6_{20}, 7_{21}$
.	
k	$1_{c_{2k-1}^2+1}, (2k)_{c_{2k-1}^2+2}, 2_{c_{2k-1}^2+3}, (2k+1)_{c_{2k-1}^2+4}, \dots \dots (2k-1)_{c_{2k+1}^2-2}, (2k)_{c_{2k+1}^2-1}, (2k+1)_{c_{2k+1}^2}$ $1_{C_{2k+1}^2+1}$

然而, 该方案应用到高位置分辨探测器读出时, 存在解码错误的情况。例如, 当探测器击中阳极条编号为 15, 16, 17, 18 时, 有信号的电子学通道号为 3, 4, 6, 7, 再根据表3.1反推击中通道号为 14, 15, 16, 17, 18。相较于真实的击中位置, 错误地得到了一条额外的击中条, 使得击中位置中心的重建有半根条的不确定度。随着探测器阳极读出条宽度越来越小, 击中多根条的事例会增多, 该编码读出方案会使测量所得位置分辨率变差。

对于第二章介绍的 $400 \mu\text{m}$ 条宽的 Micromegas 探测器, 现有的编码方案至

少会带来 $200\ \mu\text{m}$ 的位置测量不确定性。同时，同一个电子学通道两次复用之间隔了 4 个探测器通道，存在探测器信号重叠的情况，即两个不同探测器条的电荷量和击中时间被混叠在一起，造成击中位置重建偏移甚至错误。因此，需要对编码方案做进一步研究，使其能满足如电荷重心法等位置重建算法所需条件。

3.3 哈密顿回路编码方案研究

3.3.1 编码方案进一步分析

在现有编码方案中，两个连续探测器通道有信号时即可正确解码，并未考虑存在多个探测器通道同时有信号的情况。为不失一般性，将编码方案第 k 行提取为如图 3.7 所示对应关系。图中电子学通道 $2k$ 和 $(2k+1)$ 两次重复使用之间只间隔了 4 个通道，意味着一旦有超过 4 个探测器通道产生感应信号，电子学通道 $2k$ 或 $(2k+1)$ 会同时收集两个探测器通道的叠加信号。在解码过程中无法区分两通道的信号，因此造成重建错误。

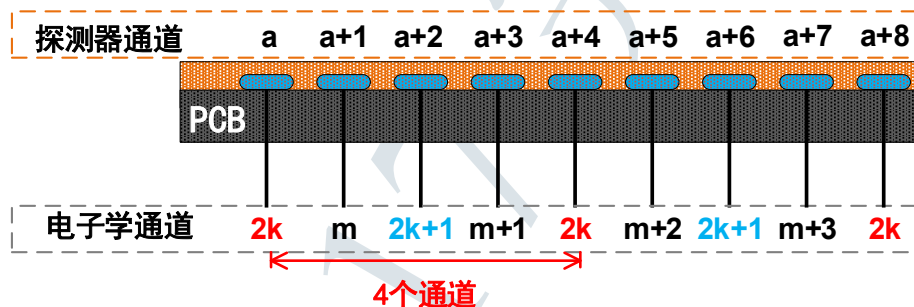


图 3.7 现有的编码方案编码表第 k 行示意图

为了克服上述问题，需要对欧拉回路的构造方式加以优化。将图 G ^① 中不经过重复顶点的简单回路称之为欧拉子回路，将欧拉子回路的边数称为该欧拉子回路的长度。若图 G 为欧拉图，则图 G 的欧拉回路可以由若干个欧拉子回路构成。对于前文所述编码方案，其欧拉子回路的最大长度为 5，即每 5 个探测器通道，电子学通道必然会重复一次。当一次事例击中的探测器通道超过 4 个时，必然存在一个电子学通道读出两个探测器通道信号的情况，使得对应通道击中信息损失，最终导致解码结果产生歧义。

要消除这样的不确定性，需要对编码规则进一步限制。对于欧拉图 G ，要构造一套编码方案，使得其最小欧拉子回路的长度达到最大。当最小欧拉子回路的长度超过单次事例击中的探测器通道数目时，编码后的信息不会混叠，其读出的通道号和电荷量信息不会损失。

^①在图论中，图的英文为 Graph，此处所称图 G 指的是一个名为 G 的图，并非图片编号之意，下同。

3.3.2 基于哈密顿回路的编码方案

目前,在数学上对于这个问题已经有了相关的研究,Shuji Jimbo 的一项研究中证明:当 n 为奇数时,在由 n 个顶点构成的完全图 K_n 中^①,存在一条欧拉回路 C ,使得 C 中任何一条欧拉子回路的长度都大于等于 $(n-4)$ ^[15]。

将顶点编号为 $0, 1, 2, \dots, n-1$, 其构造方法如下所述:

1. 首先按照如下方式构造一条哈密顿路径^② (Hamiltonian path) H_k

$$H_k := n-1 \rightarrow v_0(k) \rightarrow v_1(k) \rightarrow \dots \rightarrow v_{n-2}(k)$$

其中 $k \in \{0, 1, 2, \dots, (n-3)/2\}$, $v_i(k)$ 的定义如下 ($i \leq n-2$):

$$v_i(k) := \begin{cases} k, & i = 0 \\ (v_{i-1}(k) + i) \bmod (n-1), & i > 0 \text{ and } i \bmod 2 = 1 \\ (v_{i-1}(k) - i) \bmod (n-1), & \text{otherwise} \end{cases}$$

2. 按如下方式构造欧拉回路

$$C_n := \begin{cases} H_0 \rightarrow H_2 \rightarrow \dots \rightarrow H_{(n-5)/2} \rightarrow H_{(n-3)/2} \\ \quad \rightarrow H_{(n-3)/2-2} \rightarrow \dots \rightarrow H_1 \rightarrow n-1, & \text{if } n \bmod 4 = 1 \\ H_0 \rightarrow H_2 \rightarrow \dots \rightarrow H_{(n-3)/2} \rightarrow H_{(n-5)/2} \\ \quad \rightarrow H_{(n-5)/2-2} \rightarrow \dots \rightarrow H_1 \rightarrow n-1, & \text{if } n \bmod 4 = 3 \end{cases}$$

其中的 C_n 即为目标欧拉回路。

当 n 为偶数时,对该方案进行一定的改进即可构造相应的欧拉回路。首先,基于前 $(n-1)$ 个顶点构造哈密顿路径 $H'_k = ((n-1)-1) \rightarrow v'_0(k) \rightarrow v'_1(k) \rightarrow \dots \rightarrow v'_{n-2}(k)$, v'_i 的定义不变;然后,在每个 H'_k 的第 $n/2$ 个点和第 $(n/2+1)$ 个点之间插入第 n 个顶点,构造出新的哈密顿路径 $H_k = ((n-1)-1) \rightarrow v'_0(k) \rightarrow v'_1(k) \rightarrow \dots \rightarrow v'_{(n-4)/2}(k) \rightarrow (n-1) \rightarrow v'_{(n-2)/2}(k) \rightarrow \dots \rightarrow v'_{n-2}(k)$ 。按照前文的构造方式,这些哈密顿路径将构造出一条欧拉回路,且任意一条欧拉子回路的长度都大于等于 $n-4$ (证明过程请见下一小节)。

综上,对于任意给定的 n 个电子学通道,按上文的方法可以构造出一套编码方案。此时,电子学通道最小重复间隔为 $(n-4)$,即可以保证在任意 $(n-5)$ 个连续的探测器通道范围内,电子学通道和探测器通道是一一对应的。如使用 64 通道的读出电子学,探测器击中通道数小于 60 时,读出电子学通道和探测器通道一一对应。而对于缪子成像使用的探测器而言,宇宙线缪子事例产生的感应信号范围不会超过 60,因此该方案满足实验需求。

^①奇数个顶点构成的完全图是欧拉图,因为其每个顶点都是偶点。

^②若图 G 存在一条回路 P , P 通过图 G 每个顶点各一次,则称 P 为图 G 的一条哈密顿回路^[16],在这里构造的 H_k 由于没有回到起点,故称为哈密顿路径。

3.3.3 偶数通道编码回路构造证明

n 为奇数的情况在之前的研究中得到证明^[15], 下面对 n 为偶数的情况进行证明。

为了便于区分, 令 $m = n - 1$, 则 m 为奇数。 m 个顶点构成的哈密顿回路为 $H_k := (m - 1) \rightarrow v_0(k) \rightarrow v_1(k) \rightarrow \cdots \rightarrow v_{m-2}(k)$, 其中 $k \in \{0, 1, 2, \dots, m - 2\}$, $v_i(k)$ 的定义为:

$$v_i(k) := \begin{cases} k, & i = 0 \\ (v_{i-1}(k) + i) \bmod (m - 1), & i > 0 \text{ and } i \bmod 2 == 1 (i \leq m - 2) \\ (v_{i-1}(k) - i) \bmod (m - 1), & \text{otherwise} \end{cases}$$

易得

$$\begin{aligned} v_0(k) &= k \\ v_1(k) &= (v_0(k) + 1) \bmod (m - 1) = (k + 1) \bmod (m - 1) \\ v_2(k) &= (v_1(k) - 2) \bmod (m - 1) = (k - 1) \bmod (m - 1) \end{aligned}$$

对于任意的 $s \geq 0, s \leq \frac{m-3}{2}$ 且 $s \in \mathbb{N}$, 有

$$\begin{aligned} v_{2s+1}(k) &= (v_{2s}(k) + 2s + 1) \bmod (m - 1) \\ &= [(v_{2s-1}(k) - 2s) \bmod (m - 1) + 2s + 1] \bmod (m - 1) \\ &= (v_{2s-1}(k) + 1) \bmod (m - 1) \end{aligned}$$

由此可得

$$\begin{aligned} v_{2s+1} &= (v_1(k) + s) \bmod (m - 1) = (k + s + 1) \bmod (m - 1) \\ v_{2s+2} &= (v_{2s+1} - 2s - 2) \bmod (m - 1) = (k - s - 1) \bmod (m - 1) \end{aligned}$$

故 $v_i(k)$ 的定义等价于

$$v_i(k) = \begin{cases} k, & i = 0 \\ \left(k + \frac{i+1}{2}\right) \bmod (m - 1), & i > 0 \text{ and } i \bmod 2 == 1 \quad (i \leq m - 2) \\ \left(k - \frac{i}{2}\right) \bmod (m - 1), & \text{otherwise} \end{cases}$$

在每个 H_k 的第 $n/2$ 个点和第 $(n/2+1)$ 个点之间插入顶点 $n-1$, 构造出新的路径 $H'_k := ((n-1)-1) \rightarrow v'_0(k) \rightarrow v'_1(k) \rightarrow \cdots \rightarrow v'_{(n-4)/2}(k) \rightarrow n-1 \rightarrow v'_{(n-2)/2}(k) \rightarrow \cdots \rightarrow v'_{n-3}(k)$ 。

根据 $v'_i(k)$ 定义, 当 $i \neq j$ 时, $v'_i(k)$ 与 $v'_j(k)$ 相异, 而顶点 $(n-1)$ 与任意的 $v'_i(k)$ 相异, 故 H'_k 为哈密顿路径。

构造一条回路^①

$$C'_n := \begin{cases} H'_0 \rightarrow H'_2 \rightarrow \cdots \rightarrow H'_{(n-6)/2} \rightarrow H'_{(n-4)/2} \\ \rightarrow H'_{(n-4)/2-2} \rightarrow \cdots \rightarrow H'_1 \rightarrow (n-2), & \text{if } n \bmod 4 == 1 \\ H'_0 \rightarrow H'_2 \rightarrow \cdots \rightarrow H'_{(n-4)/2} \rightarrow H'_{(n-6)/2} \\ \rightarrow H'_{(n-6)/2-2} \rightarrow \cdots \rightarrow H'_1 \rightarrow (n-2), & \text{if } n \bmod 4 == 3 \end{cases}$$

相较于 m 个顶点的情况, 插入了 1 个顶点, 原有的哈密顿路径长度均增加 1, 而第 n 个顶点出发回到第 n 个顶点的哈密顿回路的长度为 n , 哈密顿回路长度最小值大于 $(n-4)$ 成立。因此, 只要证明 C'_n 为欧拉图即可。

由于 C_m 为欧拉图, 因此, 当 $n = m + 1$ 为时, 只需要证明对于构成 C'_n 的所有 H'_k , 其中的路径 $v'_{(n-4)/2}(k) \rightarrow n-1 \rightarrow v'_{(n-2)/2}(k)$ 都不相同。

对于任意的 $k \leq \frac{n-4}{2}$, 路径 $v'_{(n-4)/2}(k) \rightarrow n-1 \rightarrow v'_{(n-2)/2}(k)$ 不相同的一个充分条件是: 对于任意的 $i, j \geq 0$ 且 $i, j \leq \frac{n-4}{2}$, $v'_{(n-4)/2}(i)$ 与 $v'_{(n-2)/2}(j)$ 相异。由于 n 为偶数, 分两种情况讨论, $n = 4s$ 和 $n = 4s + 2, (s \in \mathbf{N})$ 。

当 $n = 4s$ 时

$$\begin{aligned} v'_{(n-4)/2}(j) &= \left(j - \frac{\frac{n-4}{2}}{2} \right) \bmod (n-2) = \left(j - \frac{n}{4} - 1 \right) \bmod (n-2) \\ v'_{(n-2)/2}(i) &= \left(j + \frac{\frac{n-2}{2}+1}{2} \right) \bmod (n-2) = \left(i + \frac{n}{4} \right) \bmod (n-2) \end{aligned}$$

下面采用反证法: 假设 $v'_{(n-2)/2}(i) = v'_{(n-4)/2}(j)$, 则 $\left(i + \frac{n}{4} \right) \bmod (n-2) - \left(j - \frac{n}{4} - 1 \right) \bmod (n-2) = 0$, 将其化简后可得:

$$\left(i - j + \frac{n}{2} + 1 \right) \bmod (n-2) = 0$$

进一步可得:

$$(i - j) \bmod (n-2) = \frac{n-2}{2}$$

i, j 为整数且取值范围为 $\left[0, \frac{n-4}{2} \right]$, 故 $(i-j)$ 的取值范围为 $\left[-\frac{n-4}{2}, \frac{n-4}{2} \right]$, $(i-j) \bmod (n-2)$ 的取值范围为 $\left[0, \frac{n-4}{2} \right]$, 与 $(i-j) \bmod (n-2) = \frac{n-2}{2}$ 矛盾, 故假设不成立。

即在 $n = 4s, (s \in \mathbf{N})$ 时, 对于任意的 $i, j \geq 0$ 且 $i, j \leq \frac{n-4}{2}$, $v'_{(n-4)/2}(i)$ 与 $v'_{(n-2)/2}(j)$ 相异。

当 $n = 4s + 2$ 时,

$$\begin{aligned} v'_{(n-4)/2}(i) &= \left(i + \frac{n}{4} - 1 \right) \bmod (n-2) \\ v'_{(n-2)/2}(j) &= \left(j - \frac{n}{4} - \frac{1}{2} \right) \bmod (n-2) \end{aligned}$$

^①注: 偶数个顶点的欧拉图, 最大连接方式是从一个奇点出发, 回到另外一个奇点, 也就是 C'_n 还可以继续到顶点 $(n-1)$, 然而这样会破坏哈密顿回路长度最小值大于 $(n-4)$ 这条性质, 在应用中不建议增加这一条通道。

同理 $v'_{n-4/2}(i)$ 与 $v'_{n-2/2}(i)$ 相异。

故 C'_n 中不存在经过重复边的路径，即 C'_n 为欧拉图，且其中哈密顿回路的最小长度大于 $n-4$ 。

证毕。

3.3.4 编码表及编码电路设计

在之前的研究中，多将编码电路设计在探测器读出阳极板上，这样的方式不利于编码电路的研究和改进，也不利于相关探测器的研究和设计。在本研究中将编码电路独立于探测器阳极板设计，可以根据实际需要更换不同的编码方案，而不影响探测器设计。

哈密顿回路方案的编码表和电子学通道数目相关，在本研究中选择电子学通道数目为常用的 64 通道，按照 3.3.2 节所述方案构造哈密顿路径，并根据欧拉回路得到相应的编码表（编码表构造算法请见附录 A）。

64 个电子学通道理论上能完成 1986 路探测器通道的读出，综合考虑通道数和机械结构，设计了 512 探测器通道编码至 64 个电子学通道的编码板，如图 3.8 所示^①。该编码读出板与探测器接口区域采用分立设计，以兼容不同规模的探测器，并且保证解码算法不变。为了消除由于探测器通道并联带来的接地电阻减小问题，将探测器的接地电阻集成至编码电路部分，避免编码过程对探测器性能造成影响。



图 3.8 基于哈密顿回路的编码读出板实物图

3.3.5 解码算法设计

实际应用中，可能存在噪声干扰和探测器打火等情况，从而引入错误的击中条。为了排除错误击中，解码算法要满足如下两条优先级规则：

^①编码算法和原理图设计由作者本人完成，PCB 绘制由同项目组刘建国完成，特此说明。

1. 将读出通道尽可能用于解码。当存在错误击中时，不能成功解码，去掉其中一个通道再进行解码，此时可能存在多个成功解码的结果，按照第二条优先级规则判断；若仍不能成功解码，再去掉一个通道进行解码，直至剩下单个通道，此时记录下电荷量最大的通道；
2. 探测器信号分布需符合感应电荷分布规律，并且总电荷量大的解码结果更可信。

在解码过程中，利用探测器击中通道必定连续这一特点，将电子学可能对应的探测器通道全部列举出来，并对其排序。在排序结果中，选取与电子学通道数目一致的连续探测器通道作为最终解码结果，当解码结果出现歧义时，按照上述两条规则进行判断。最后，再根据编码表得到每个探测器条对应的电荷量信息。

3.4 编码电路测试

3.4.1 噪声测试

直接编码读出方案将多个探测器条连接在一起，单个电子学通道对应的探测器电容增大，这会导致电荷灵敏前放的噪声增大^[17-18]。为了衡量编码电路对前端电子学噪声的影响，选择 Micromegas 探测器作为待测探测器，使用同一个电荷灵敏前放对哈密顿回路编码板和原方案编码板噪声进行测量，从而分析不同编码电路对电荷灵敏前放的噪声贡献。

两种编码方案所测噪声统计分布如图 3.9 所示，哈密顿回路编码方案测得噪声约为 $0.6 fC$ ，满足缪子成像实验需求，且比旧编码方案^①噪声更低。

哈密顿回路编码方案与旧编码方案噪声随通道变化对比如图 3.10 所示，旧编码方案截取了编码表中的一段，每个电子学通道连接的探测器通道数不同，各通道的噪声水平也不同，噪声水平高低和每个电子学通道连接的探测器通道数目相关。基于哈密顿回路的编码方案截取编码表任意行可以保证编码比一致，使得读出电路的性能更均匀。

3.4.2 噪声抑制能力测试

噪声引起的电子学通道误击中，可能会造成解码错误，基于哈密顿回路的编码方案，可以在一定程度上可以对噪声和真实信号击中进行区分。当真实信号在电子学通道 chn_a 和 chn_b 上有信号时，若有噪声引起了电子学通道 chn_{noise} ，则解码的结果可能会有三种可能性： (det_a, det_b) 、 $(det_a, noise)$ 和 $(det_b, noise)$ ，解码过程将无法区分这三种可能性。当真实信号在 3 个电子学通道上产生信号时，若噪声在第 4 个电子学通道上产生误击中，则可以根据通道最大连续性，排除由

^①由于已经提出了新编码方案——哈密顿回路编码方案，将之前的方案称之为旧编码方案，后同。

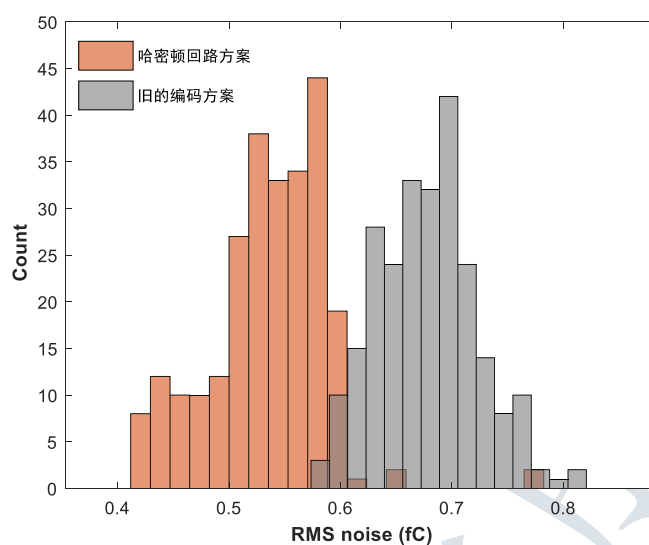


图 3.9 哈密顿回路编码方案与旧编码方案噪声统计结果

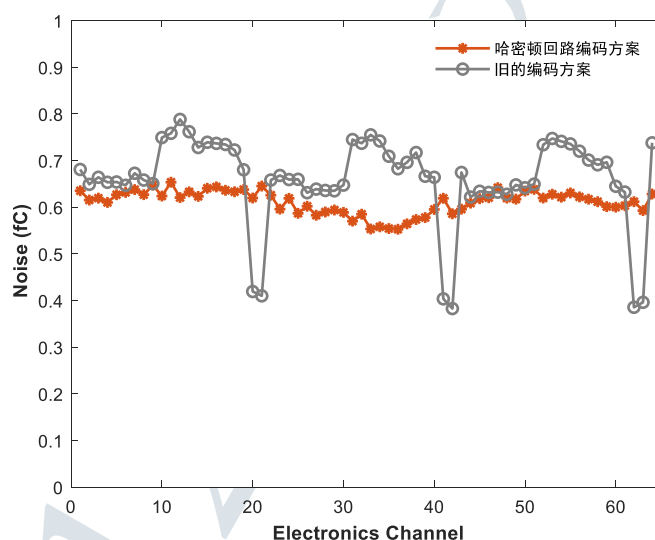


图 3.10 哈密顿回路编码方案与旧的编码方案噪声对比

于噪声引起的不连续解码结果。真实击中的探测器通道数越多，能用于解码的信息量越大，将噪声击中从真实信号中排除的可能性越大。本研究采用的哈密顿回路编码方案并没有使用所有的编码组合，保留了更多击中信息，更利于将真实击中和由噪声引发的误击中区分开。

为了验证编码电路和解码算法对噪声的区分能力，用计算机模拟的方式产生 n 个探测器击中信号，根据编码表得到其对应的电子学通道。然后在电子学通道中叠加 t 个噪声通道，得到一共 $(n + t)$ 个通道用于解码。最后对比原始击中位

置和解码击中位置的误差,得到不同噪声通道数目对解码准确率的影响,其算法流程图如图3.11所示。

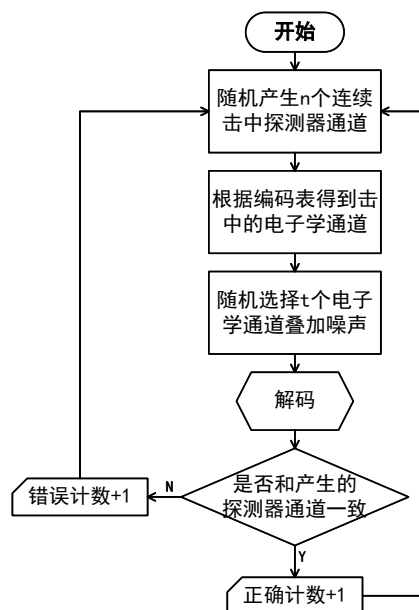


图 3.11 验证哈密顿回路编码方案噪声区分能力算法流程图

图3.12为不同真实击中通道数条件下,噪声击中和解码成功率之间的关系。由于仅使用编码表的前几行,噪声误击中对解码结果的影响有两种可能性:一是噪声击中恰好在连续击中的边界部分,这将使得解码的结果偏移;二是误击中的位置构成能解码的连续通道,使得真实击中和误击中无法区分。真实击中的通道数目越多,对上述两种情况的排除能力也就越强。

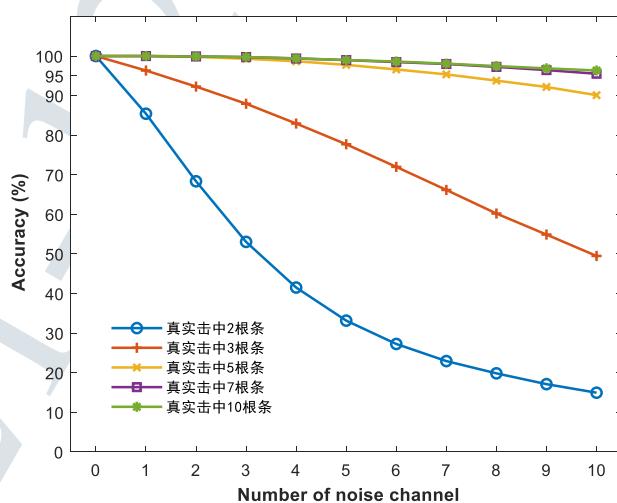


图 3.12 不同真实击中通道数和噪声通道数条件下正确解码率

第二章分析得到探测器的感应信号分布范围为2~5根探测器读出条,当缪子入射方向和探测器法向有一定夹角时,感应信号的范围更宽,将会更有利于解码和噪声排除。当没有噪声产生的误击中时,编码方案的正确解码率为100%。当真实击中条数目超过5个时,即使有10个通道受噪声影响产生误击中,该编码方案也可以实现90%的正确解码率。

此外,本研究提出的哈密顿回路编码方案在宇宙线成像实验中还有其他优势,该性能需要配合成像系统进行测试,具体测试结果详见本论文5.2.2。

3.5 本章小结

首先,针对宇宙线缪子事例率低、击中稀疏的特点,本章从Micromegas探测器信号特点出发,分析了不同通道压缩技术,其中最适合宇宙线成像应用的是直接编码读出方案。使用直接编码读出方案无需重新设计探测器,也没有特殊制作工艺需求,利于快速开展相关研究,也便于开展不同编码方案研究。

其次,本章提出了基于通道映射的直接编码读出方案原理,并根据此原理将编码方案转换为图论中的欧拉定理,从而实现编码图和编码方案的构造。本文作者所在实验室在曾实现了一种直接编码读出方案,本研究从最短欧拉子回路的角度分析了其编码方式及固有缺点。为了解决这一缺陷,本文作者调研了奇数顶点完全图的最大欧拉子回路定理,并将其推广至偶数顶点的情况,最终实现了基于哈密顿回路的编码读出方案。

最后,本章实现了基于哈密顿回路方案的编码电路,该电路可以完成512路探测器通道到64路电子学通道的编码。测试结果表明:哈密顿回路编码方案噪声性能满足宇宙线成像实验需求,且通道均匀性和抗噪声能力优于现有码方案。

参考文献

- [1] OLIVE K. Review of particle physics[J/OL]. Chinese Physics C, 40(10): 100001[2019-12-23]. <http://stacks.iop.org/1674-1137/40/i=10/a=100001?key=crossref.5ca5f9c166adc59f41e03a802b715c19>. DOI: 10.1088/1674-1137/40/10/100001.
- [2] OVERBECK M, BRESKIN A, BRÜGGER M, et al. A heavy-ion identification system for the detection of rare events[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 288(2): 413-420[2021-03-04]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016890029090132P>. DOI: 10.1016/0168-9002(90)90132-P.
- [3] GUEDES G P, BRESKIN A, CHECHIK R, et al. Two-dimensional GEM imaging detector

- with delay-line readout[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 513(3): 473-483[2021-03-04]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203020175>. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)02017-5.
- [4] 鞠旭东, 董明义, 欧阳群. 阵列型阻性阳极四角读出重建算法研究: 第七届全国先进气体探测器研讨会[Z]. 广西大学, 广西, 中国: 核探测与核电子学国家重点实验室, 中国科学院高能物理研究所, 2017.
- [5] BESCH H J, JUNK M, MEIBNER W, et al. An interpolating 2d pixel readout structure for synchrotron x-ray diffraction in protein crystallography[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 392(1): 244-248[2021-03-04]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900297002799>. DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00279-9.
- [6] JU X D, DONG M Y, ZHAO Y C, et al. Two-dimensional imaging triple-GEM detector with resistive anode readout[J/OL]. Journal of Instrumentation, 12(10): P10008-P10008[2021-03-05]. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/10/p10008>. DOI: 10.1088/1748-0221/12/10/P10008.
- [7] LI Y, ZHENG X, LAI Y, et al. FETs array readout of GEM detector[C/OL]//2006 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record: volume 1. 2006: 325-328. DOI: 10.1109/NSSMIC.2006.356167.
- [8] BLACK J K, DEINES-JONES P, JAHODA K, et al. High-sensitivity x-ray polarimetry with amorphous-silicon active-matrix pixel proportional counters[C/OL]//X-Ray and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy XIII: volume 5165. International Society for Optics and Photonics, 2004: 346-353[2021-03-05]. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/5165/0000/High-sensitivity-x-ray-polarimetry-with-amorphous-silicon-active-matrix/10.1117/12.504862.short>.
- [9] KATARIA D O, CHAUDERY R, REES K. High-speed position readout for microchannel plate-based space plasma instruments[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 573(1): 240-242[2021-03-05]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900206021814>. DOI: 10.1016/j.nima.2006.10.247.
- [10] 胡荣江, 段利敏, 杨贺润, 等. MICROMEGAS 一维位置编码读出初步测试[J/OL]. 原子核物理评论, 28(4): 459-463[2021-03-05]. <http://www.npr.ac.cn/cn/article/doi/10.11804/NuclPhysRev.28.04.459>.
- [11] 祁宾祥. 微结构气体探测器位置编码读出方法研究[EB/OL]. 中国科学技术大学(2015)[2020-07-14]. <https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&dbname=>

CDFDLAST2018&filename=1016049942.nh&uid=WEEvREcwSlJHSldRa1FhcTdnTnhYWU9NTzduNjVpMnlyaEdpZE02ZUkwVT0=\$9A4hF_YAuvQ5obgVAqNKPCYcEjKensW4IQMovwHtwkF4VYPoHbKxJw!!&v=MDE3NTBqSXJaRWJQSUI4ZVgxTHV4WVM3RGgxVDNxVHJXTTFGckNVUjdxZlIPZHJGeS9rVXJ6TVZGMjZHTE84Rjk=.

- [12] PROCUREUR S, DUPRÉ R, AUNE S. Genetic multiplexing and first results with a $50\times 50\text{cm}^2$ micromegas[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 729: 888-894[2019-12-17]. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900213012126>. DOI: 10.1016/j.nima.2013.08.071.
- [13] QI B X, LIU S B, JI H, et al. A novel method of encoded multiplexing readout for micro-pattern gas detectors[J/OL]. Chinese Physics C, 40(5): 056102[2020-11-17]. <https://doi.org/10.1088%2F1674-1137%2F40%2F5%2F056102>. DOI: 10.1088/1674-1137/40/5/056102.
- [14] DIESTEL R. Graduate texts in mathematics: Graph theory[M/OL]. 5th ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2017[2021-03-15]. <https://www.springer.com/gp/book/9783662536216>. DOI: 10.1007/978-3-662-53622-3.
- [15] JIMBO S. The eulerian recurrent lengths of complete graphs[J]. 7.
- [16] 卢开澄, 卢华明. 图论及其应用[M]. 清华大学出版社有限公司, 1995.
- [17] 核电子学讲义[M]. 清华大学工程物理系核电子学研究室, 2011.
- [18] NOULIS T, FIKOS G, SISKOS S, et al. Noise analysis of radiation detector charge sensitive amplifier architectures[J]. 4.

第4章 读出电子学系统研究

根据第二章分析,读出电子学分为前端电子学和后端电子学两部分。前端电子学完成 Micromegas 探测器信号读出,将模拟信号数字化后传输至数据获取系统,在自触发工作模式下,向触发模块发送芯片过阈信号。后端电子学包含数据获取系统、时钟触发系统和慢控制模块,数据获取系统负责汇总多个前端电子学的的数据,并将其组包发送至服务器;时钟和触发系统负责处理触发信号和产生时钟信号,并向前端电子学发送时钟和触发;慢控制模块负责从服务器接收配置并发送至前端电子学。在缪子成像应用中,数据获取系统、时钟触发系统和慢控制模块可以在一块后端电子学板上实现。针对缪子成像应用的特点,本章将对读出电子学的设计方案和实现进行研究。

4.1 读出电子学架构设计

针对不同成像目标,成像系统的体量不同,即使经过编码后,透射成像和散射成像实验所需通道数相差 2500 ~ 5000 路,其对读出电子学的需求不同。因此,读出电子学需具有较强的可扩展性。同时,应对不同的成像需求,前端电子学也会不同,读出电子学需具有较强的通用性。

基于上述分析,本研究提出了一套如图 4.1 所示的读出电子学架构。探测器信号经过编码读出板后,送至高集成度前端电子学进行模数转换;转换后的数字信号送至后端电子学进行汇总,并最终存至服务器或小型工作站。

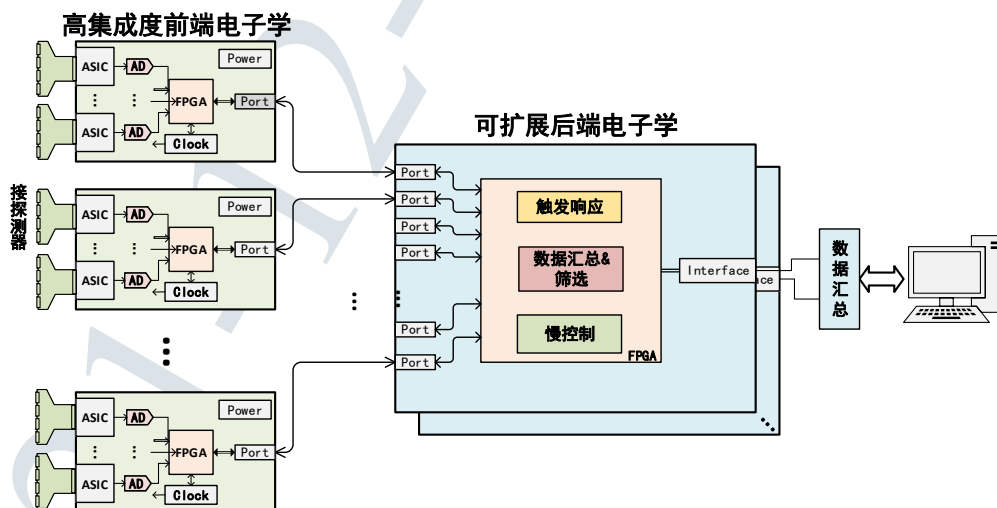


图 4.1 应用于宇宙线的通用可扩展读出架构

4.1.1 面向前端电子学的可扩展设计

在与前端电子学通讯的数据接口方面,目前常用的有 LVDS (Low Voltage Differential Signal) 通讯和光纤通讯两种方式。由于缪子散射成像实验场地复杂,面临着复杂的环境和外界干扰,采用光纤接口通讯可以减少后端电子学对前端电子学的噪声干扰。常用的单模光纤可以实现数公里长度的通讯,利于在不同环境下开展宇宙线缪子成像实验。

作为一种通讯媒介,光纤通讯主要的功能是实现光信号和电信号之间的相互转换,并没有规定具体的通讯协议。在大多数应用中,光纤通讯使用 FPGA (Field-Programmable Gate Array) 的高速串行接口 (GTP、GTX、GTH 等) 实现。由于有专用的硬件电路设计,利用相应的 IP 核 (Semiconductor Intellectual Property Core),FPGA 高速串行接口可以实现时钟数据解串、数据帧对齐等功能,并且可以达到较高的数据传输率 (如 GTP 数据率范围为 0.5Gbps ~ 6.25Gbps^[1], GTX 为 0.5Gbps ~ 12.5Gbps^[2]),其数据率完全能够满足缪子成像实验需求。

然而,在宇宙线缪子成像实验中,使用的前端电子学板数量较多,并且数据传输率要求未达到 GTP 接口的下限。若全部使用高速串行接口实现,将会极大地增加后端电子学板设计的复杂度,并带来不必要的功能和功耗浪费。在实验室之前的研究中,验证了使用 FPGA 的普通管脚也可以驱动光电收发器进行通讯^[3]。FPGA 高速接口提供专用的逻辑资源用于数据收发功能,在缪子成像实验所需的数据率条件下,使用 FPGA 的普通 LVDS 管脚也可以实现对应功能,并且可以根据成像实验特点自行设计相应的通讯协议。经过编译和综合验证,单个接口逻辑仅占用约 0.5% 的 FPGA 资源,占用资源量极小,不影响后端电子学板其他功能实现。

因此,针对宇宙线缪子成像应用,前端电子学板与后端电子学板的数据传输,将使用普通 LVDS 管脚实现的光纤通讯方案。该方案极大地减少系统复杂度并降低系统功耗,便于读出电子学按照成像实验需求进行扩展或剪裁。

前端电子学与后端电子学通讯方式如图 4.2 所示,将后端电子学向前端电子学发送数据称为下行链路,前端电子学向后端电子学发送数据称为上行链路。

后端电子学将时钟和数据以 DC (Direct Current) 平衡编码方式向前端电子学板发送,前端电子学板需设计有相应的时钟数据恢复芯片 (CDR, Clock and Data Recovery),从串行流中将时钟和串行数据解出。时钟信号经过 PLL (Phase-Locked Loop) 处理后作为系统工作时钟使用,串行数据经过 DC 平衡解码和相应的下行协议解码后,转换为触发和命令送至相应模块。

前端电子学产生的自触发信号和采集数据经过上行协议编码和 DC 平衡编码后,通过同一根光纤传输至后端电子学。该数据流所对应的时钟域与后端电子

学时钟同源，故后端电子学板无需为每个上行链路设计相应的 CDR 电路，通过 FPGA 逻辑可实现接收数据的相位调节，具体调节过程详见本论文后端电子学逻辑设计部分4.2.2。上行数据流经过相应的解码模块后，输出触发和数据供其他模块使用。

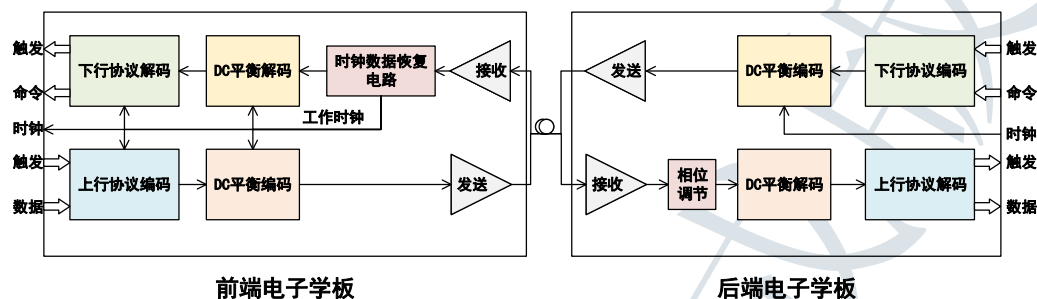


图 4.2 基于 FPGA 普通 IO 的自定义通讯协议

4.1.2 面向数据存储系统的可扩展设计

针对不同规模的成像实验，数据获取方案如图 4.3所示。缪子成像实验具有应用场合复杂、灵活移动的特点，采用 USB3.0、以太网和光纤通讯利于成像实验开展。

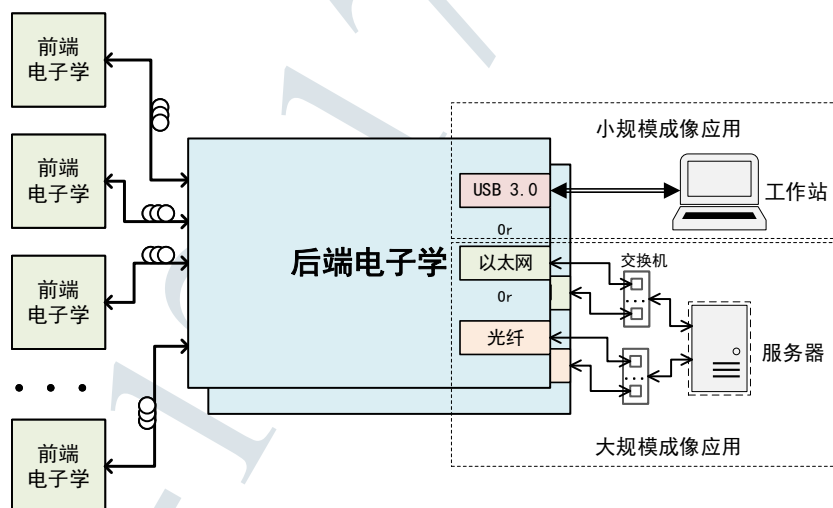


图 4.3 面向不同数据存储系统的可扩展设计

面向小规模成像应用时，使用单个后端电子学板，通过 USB 接口将数据传输至小型工作站。使用 USB 方案，有利于提升系统稳定性，降低系统功耗和复杂度。为了便于将来实验进行系统扩展，选择 USB3.0 协议进行数据传输，其理论最大传输速率为 5 Gbps。本研究中选择 Cypress 公司的 CY3014 芯片^[4]作为 USB 驱动芯片，该芯片最大支持 3.2 Gbps 的用户数据传输，满足实验需求。

当面向大规模成像时，需使用多个后端电子学板，其数据通过交换机后汇总至服务器。在当前的粒子物理实验中，以太网通讯^[5]和光纤通讯^[6]都有相应的解决方案。

以太网方案主要由FPGA实现的TCP/IP协议为主，使用千兆网可以实现单板1 Gbps的数据通讯率，通过交换机将多板数据汇总至服务器实现数据存储。使用以太网方案，易于实现通用的缪子成像实验装置。

在实验室之前的工作中，本文作者曾参与基于光纤传输的数据获取系统研究^[7-8]。在该方案中，后端电子学板将数据汇总后，通过光纤将数据传输至服务器上的PCIe板卡中；板卡数据通过上位机存至硬盘后，数据分析程序对其进行实时分析。利用该系统，单块后端电子学板能够实现最高3.2 Gbps的有效数据传输率，完全满足宇宙线成像实验需求。同时，系统还具有很强的可扩展性，通过改变配置参数，单个服务器板卡最多可以支持80路前端电子学读出，可应用于更大规模缪子成像实验。

4.1.3 触发方案设计

触发方案设计如图4.4所示，读出电子学系统根据实验需求选择不同的触发模式。工作在外触发模式时，后端电子学系统将触发分发至所有前端，前端电子学将所采集数据上传至后端电子学。

工作在自触发模式时，触发信号由前端电子学产生，通过软件配置可以选择不同的触发符合模式。在宇宙线成像实验中，触发信号由上、下游径迹系统最外层探测器提供。当有信号过阈时，前端电子学上传触发信号至后端电子学，后端电子学经过逻辑判断后，向所有前端电子学发送触发信号。

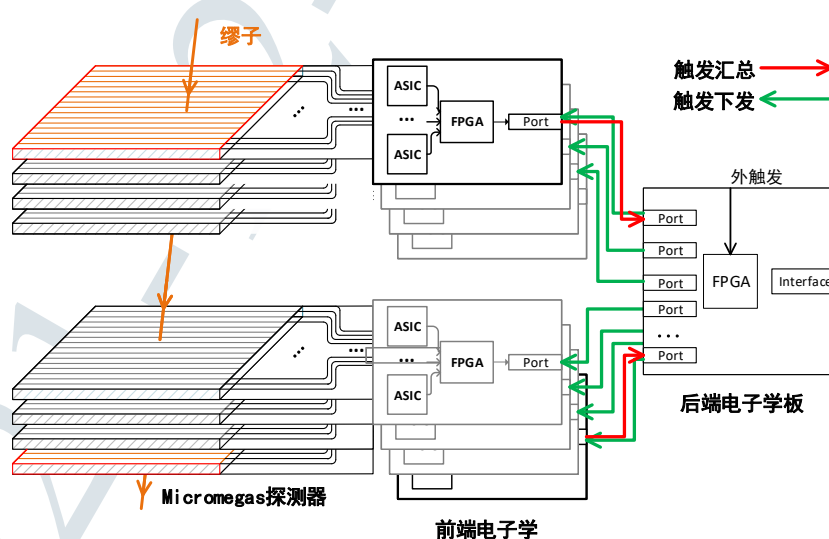


图 4.4 触发方案示意图

4.2 后端电子学设计与实现

4.2.1 后端电子学板设计

除了上一节所述的接口和触发方案设计之外，后端电子学板还需要考虑时钟方案设计和 FPGA 功能设计，下面分别对其进行论述。

1. 时钟方案设计

为了使得整个系统时钟同步，所有的时钟都由后端电子学向前端电子学发送，后端电子学的时钟系统将针对该需求进行特殊的设计。时钟方案包括两个方面的设计：时钟传输方案和后端电子学时钟源设计。

在光纤通讯中，后端电子学不需要专用的链路向前端电子学发送时钟信号，时钟发送通过对数据进行 DC 平衡编码实现。编码后的信号通过光电转换模块发送至前端电子学板，其时钟数据恢复芯片将会从 DC 平衡的串行数据流中，解出相应的时钟和与之对齐的数据。前端电子学向后端电子学发送数据时，其时钟和后端电子学板系统时钟同源。在后端电子学上，数据接收和对齐可以使用 FPGA 的可编程逻辑资源实现，无需为每条数据链路再设计时钟数据恢复电路。

为了适应不同的实验环境，后端电子学的时钟源可以从服务器获得，也可以由本地晶振产生。后端电子学的时钟设计方案如图 4.5 所示，系统工作时钟和参考时钟均由一片 Jitter Cleaner 芯片产生，芯片的时钟源可以在本地晶振或者服务器时钟之间切换。当使用服务器作为控制和数据存储系统时，FPGA 将从服务器传输的数据流中解出时钟，并将其送至 Jitter Cleaner 芯片，芯片对输入时钟进行抖动滤除（Jitter Clean）后，将时钟传输至 FPGA 作为系统时钟和数据发送参考时钟，从而实现整个电子学系统时钟和服务器时钟同源。当后端电子学连接至小型工作站时，Jitter Cleaner 时钟源切换至本地晶振，并将其作为系统工作时钟。

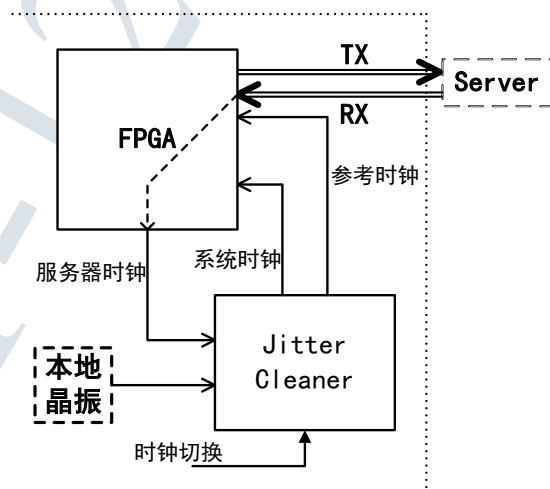


图 4.5 后端电子学时钟设计方案

2. FPGA 设计

作为后端电子学板的主控芯片，FPGA 主要负责前端电子学板配置、数据汇总与筛选、时钟分发、触发判断与产生等功能。从逻辑资源量、IO 管脚数目、存储资源量等方面考虑，选择 Xilinx 公司 Kintex-7 系列 XC7K410T FPGA，其主要资源量参数如表4.1所示。

表 4.1 XC7K410TFGG900 资源量

Logic cell	Slices	RAM (kb)	Clock	I/O	GTX
406k	63,550	28,620	10	500	16

后端电子学板还需要电源方案、复位方案等辅助功能设计，由于属于常见功能，本文不再赘述。

3. 后端电子学板

后端电子学板结构如图 4.6所示，采用子母板设计方案。前端电子学通信接口放置于子板上，使用 FMC (FPGA Mezzanine Card) 接口与后端电子学母板相连，便于扩展至不同需求的成像实验。时钟芯片采用 SiliconLab 公司的 Si5345 系列芯片，可以满足系统时钟和高速收发器参考时钟需求。（后端电子学板照片请见本论文附录G。）

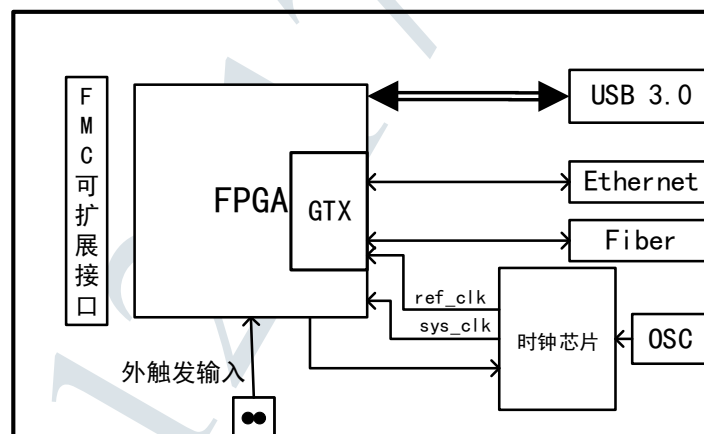


图 4.6 后端电子学板结构示意图

4.2.2 后端电子学逻辑功能设计

后端电子学主要逻辑功能包括：数据链路编码、数据接收与筛选、触发接收与产生、USB 芯片控制、高速串行接口控制等。下面将对各个模块功能设计进行介绍。

1. 数据链路编码

基于普通 IO 实现的光纤链路, 可以灵活地根据实验需求设计相应的通讯协议。前端电子学要从下行链路中解出系统时钟, 需要采用 DC 平衡编码。由于下行链路数据量不大, 采用最易实现的曼切斯特编码 (Manchester encoding)^[9] 作为下行链路的编码方案。曼切斯特编码的基本原理是使用低电平到高电平的跳变表示逻辑 0, 高电平到低电平的跳变表示逻辑 1。在设计中, 下行数据率为 100 Mbps, 利用分时复用的方式将其分为 3 个数据通道, 分别传输触发信号、配置命令和下行数据包。其中触发信号带宽为 50 Mbps, 配置命令和下行数据包各占 25 Mbps 带宽, 将触发信号穿插在配置命令和下行数据包之间发送, 保证触发信号及时下发。

上行链路需要传输大量的采集数据, 为了不损失传输带宽, 采用自同步扰码器方式 (Self-synchronous scrambling)^[10] 实现数据编码。使用扰码器方式, 当数据量足够大时可以保证串行数据流 DC 平衡。上行链路数据率设计为 400 Mbps, 同样分为三个通道, 其中触发通道和命令通道带宽为 100 Mbps, 数据通道带宽为 200 Mbps。

2. 数据接收与筛选

上行链路数据与后端电子学板时钟是同步的, 因此在后端电子学板上没有设计相应的电路对其时钟进行恢复。为了避免数据链路出现亚稳态, 需要使用 FPGA 提供的专用硬件资源, 对输入管脚信号进行适当地延迟调节。Xilinx 公司的 7 系列 FPGA 集成有专用数据输入延迟调节模块 IDELAYE2, 可以对每个管脚的输入信号进行独立延迟调节^[11]。通过外部逻辑控制, IDELAYE2 能够实现 32 个步长的延迟时间调节。在本设计中, 设置单个调节步长为 78 ps, 延迟调节时间范围为 0 ns ~ 2.5 ns, 该范围满足 Kintex-7 FPGA 所需的建立保持时间。为了找到最稳定的延迟量, 在系统初始化后, 上行链路一直发送“0101”编码, 延迟调节模块使用 D 触发器对串行编码进行锁存。若 D 触发器出现亚稳态, 则相邻两个时钟周期的采样数据存在不互相取反的情况。通过对大量数据流进行统计, 得到不同延迟条件下正确采样率。若正确采样率不为 100%, 表示此时链路延迟不满足。对 IDELAYE2 的 32 个延迟步长进行扫描, 找到其中没有亚稳态的延迟状态, 使用该延迟量完成上行链路延迟调节。延迟调节完成之后, 上行链路会发送空闲状态码“0100”, 帧检测模块将该数据帧进行对齐, 实现对触发、命令和数据通道的解码。

图 4.7 所示为后端电子学建立链路流程图。上电后, FPGA 的 IDLYCTRL 模块会对参考时钟进行检测, 参考时钟稳定后, 该模块输出初始化完成信号。之后, FPGA 逻辑进入链路延迟调节模块, 先将 IDELAYE2 的延迟步长初始化为 0。满足建立保持时间的延迟步长一定属于一段连续区间, 因此设置两个指针 start_ptr

和 `end_ptr`，分别表示稳定步长的起点和终点。对当前步长统计是否出现亚稳态，若出现亚稳态则 `start_ptr` 增加 1，表示该状态不是稳定区间的起点；反之若在一定数据量后没有出现亚稳态，则 `end_ptr` 增加 1，表示该延迟值可能是稳定区间的终点。对所有步长扫描完成后，取没有亚稳态区间的中点作为最终设置的步长，即将延迟值设置为 $(\text{start_ptr} + \text{end_ptr})/2$ 。链路延迟调节完成后，开始对链路上的数据帧进行检测，将串行数据转换成 4 bits 并行数据，其帧组合情况可能有四种，选择组合结果为“0100”的组合作为最终的数据帧，并从中解出不同通道的数据。

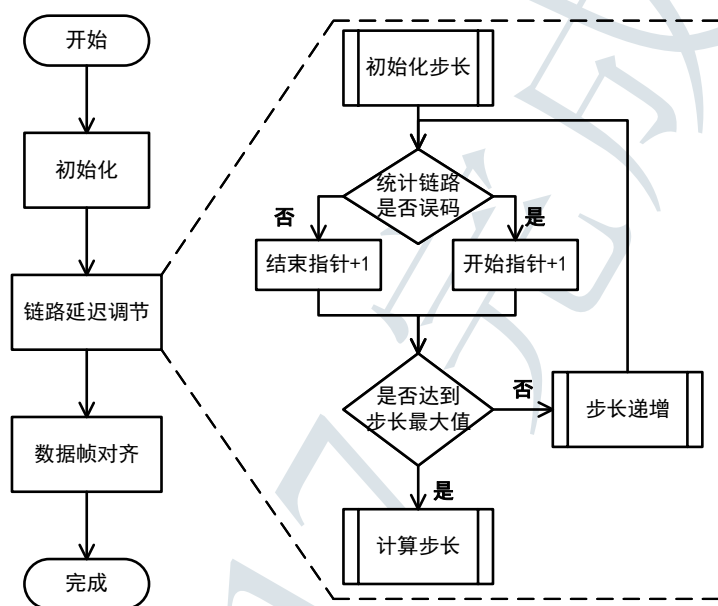


图 4.7 自定义协议光纤链路建立流程图

由于前端电子学会采样到大量的基线数据，宇宙线事例只占其中的少量采样单元。因此，上行数据先传输至数据筛选模块，将采集到的基线舍去，仅保留数据中有效波形部分，实现对数据的进一步压缩。当触发下发后，数据筛选模块将对前端电子学上传数据接口进行轮询，对有数据的前端电子学板逐一读出，同时对每帧数据进行 CRC (Cyclic Redundancy Check) 校验。最后将有效数据和校验结果传输至数据通讯接口，由数据发送模块传输至工作站或服务器。

3. 触发接收与产生

根据不同配置，后端电子学有自触发和外触发两种模式。在自触发模式中，后端电子学将从上行数据链路中解出触发信号，判断有触发的前端电子学数目，然后将触发号和触发命令下发至每块前端电子学板。在外触发模式中，外触发信号通过后端电子学板上的 SMA (SubMiniature version A) 接口输入至 FPGA，触发模块接收到外触发后，将触发号和触发命令发送至前端电子学板。

4. USB 芯片控制

通过固件设置,将 USB 芯片配置为 Slave FIFO (First-In First-Out) 模式, FPGA 作为主设备对 USB 芯片进行控制。在该模式中,将芯片存储空间配置为两个终端 (Endpoint),分别负责数据上传和下发,每个终端各配置有一定数量的 FIFO,并且有相应的 FIFO 状态标志位和 FPGA 相连^[12]。

图 4.8 为 FPGA 对 USB 芯片读出控制流程图,为了保证上位机对读出电子学控制,USB 芯片读出控制模块处于下行优先模式。状态机一直对下行 FIFO 的非空状态进行检测,上位机向 USB 芯片发送命令后,下行 FIFO 变为非空状态。FPGA 检测到该状态后,将数据从下行 FIFO 中读出,然后将数据送至命令解析模块进行处理。

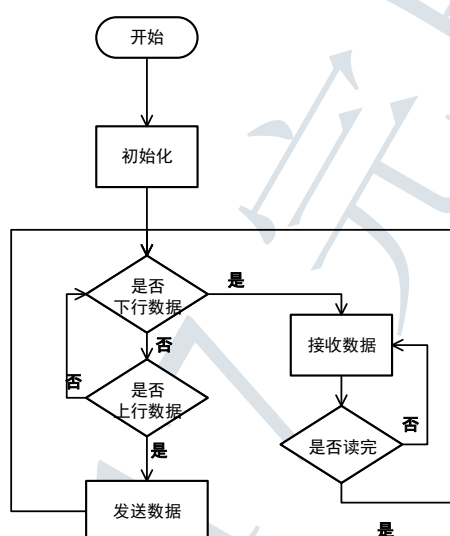


图 4.8 SlaveFIFO 模式下 USB 读写状态图

当有数据需要上传时, FPGA 通过地址控制线和数据总线,向上传终端的 FIFO 写数据,当前 FIFO 写满后将会自动切换到下一个 FIFO,并将当前 FIFO 的数据上传至计算机内存。上位机访问相应的内存空间,即可获取 FPGA 上传的数据。

USB 芯片工作时钟为 100 MHz,其数据总线位宽为 32 位,故理论数据率为 400 MB/s。在实际使用中,机械硬盘无法实现该写入速度,同时该速度也远远超过宇宙线缪子成像实验的数据传输率需求。因此,控制逻辑中两个时钟周期传输 32 bits 数据,即最大数据率设定为 200 MB/s。

5. 高速串行接口控制

当使用服务器对后端电子学进行控制时,后端电子学板上的 FPGA 通过高速串行接口 (GTX) 与服务器上的板卡进行通讯。数据传输率为 4.8 Gbps,在数据流编码过程中,将每 120 bits 数据作为一帧,帧数据的刷新率为 40 MHz。每帧数

据被划分为包头、有效数据和校验码部分。其中包头部分长度为 4 bits, 用于进行数据帧对齐; 有效数据部分长度为 84 bits, 分为 4 bits 的慢控制数据和 80 bits 的用户数据。其中的用户数据可以根据电子学读出需求划分为不同的虚拟通道, 对应于不同的前端电子学板, 可用于传输前端电子学板数据的带宽为 3.2Gbps; 校验码部分长度为 32 bits, 使用前向校验码 (FEC, Forward Error Correction) 对该帧数据进行校验。

在本方案中, 上行数据和下行数据是独立的, 因此为每个前端电子学板配置相应的数据通道, 服务器下行命令直接发送至前端电子学板。前端电子学板上行数据先经过数据接收和筛选模块, 再向相应的数据通道写入数据。

4.2.3 后端电子学测试

设计完成后, 针对两种数据传输方案分别开展了相应的数据率测试和误码率测试。

1. 数据率测试

在数据率测试中, 将后端电子学板中的数据接收和筛选模块替换为计数器, 产生相应数据率的数据, 并发送至数据传输接口, 然后利用上位机软件对数据进行接收和数据率计算。

在 USB 数据传输方案中, 计数器工作在 50 MHz 时钟域下。当 USB 芯片上行 FIFO 非满时, 计数器持续向 USB 芯片发送数据。上位机软件工作在“生产者-消费者”模式下 (详见附录B), 对 USB 芯片上传数据进行判断和存储。经过长时间稳定测试, 在不丢数的条件下, 平均数据传输率为 190 MB/s, 证明系统及逻辑能稳定运行。

在高速串行接口的传输方案中, 使用同样速率的计数器产生测试数据, 为了尽可能地减少硬盘阻塞, 先将采集到的数据存至硬盘, 然后再对其数据进行校验。在不丢数的条件下, 平均数据传输率为 200 MB/s。

2. 误码率测试

在 USB 数据传输方案中, 测试数据由伪随机二进制序列产生器 (PRBS, pseudorandom binary sequence) 产生, 将该数据发送至数据传输接口, 然后对其进行校验。随机数序列通过线性反馈移位寄存器 (LFSR, linear feedback shift register) 产生, 本测试中使用的伪随机数生成多项式为 $X^{31} + X^{28} + 1$ [13]。上行数据传输至电脑内存后, 由上位机直接从内存中取数并对其进行校验。总测试时间为 80 小时, 平均数据传输率为 190 MB/s, 共传输 4.6×10^{14} bits 数据, 没有检测到误码。因此, 在 99% 的置信概率下误码率小于 1×10^{-14} 。

在高速串行接口传输方案中, 数据前向校验码采用里德-所罗门码 (RS Code, Reed-Solomon codes), 其编码电路的本质为扰码器。因此, 高速串行接口传输的

数据可以视为伪随机序列，不需要再单独使用伪随机数产生器。在数据采集过程中，上位机软件会对每帧数据进行校验，若有错误将会在采集软件中指示错误帧的位置和内容。串行数据率为 4.8 Gbps，测试 27 小时，共传输 4.66×10^{14} bits 数据，没有检测到误码。因此，在 99% 的置信度下误码率小于 1×10^{-14} 。

上述测试表明后端电子学板在长时间工作条件下，具有良好的工作稳定性和数据链路稳定性，能满足宇宙线缪子成像实验长时间测试需求。

4.3 前端电子学设计与实现

4.3.1 前端电子学设计分析

前端电子学由前置放大器、模拟成形电路、采样电路、模数转换电路、时钟数据恢复模块、自触发产生模块、命令解析和数据上传模块组成，其结构示意图如图 4.9 所示。以模数转换为分界点，可以将前端电子学分成数字部分和模拟部分进行设计。

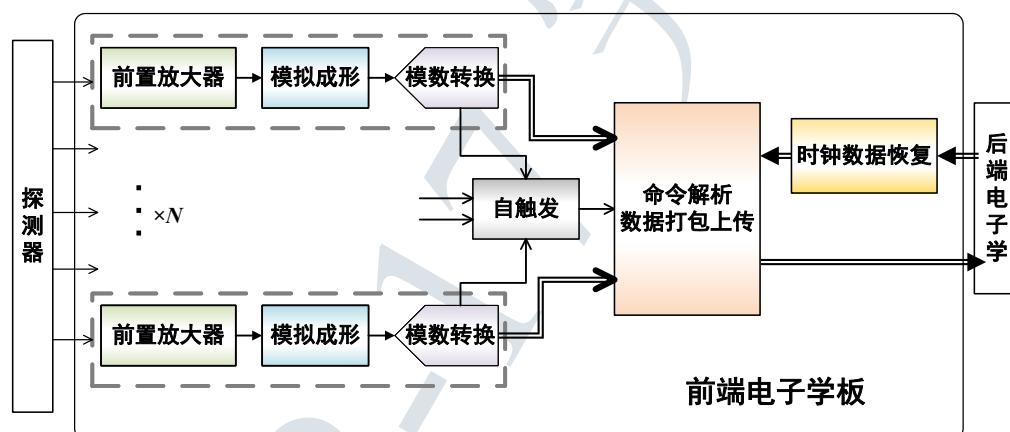


图 4.9 前端电子学功能结构示意图

数字部分需要兼顾数据率、触发延迟、时钟精度和稳定性等方面，主要由 FPGA、数据通讯接口和相应的外围电路组成。FPGA 用于控制 ASIC (Application Specific Integrated Circuit) 工作状态，提供触发逻辑、数据打包分发等功能。

模拟部分需要对每通道信号的电荷量信息进行测量，通过直接编码读出板压缩后，成像系统的读出通道数仍有数千路。为了提高系统的集成度、简化前端电子学设计，将使用 ASIC 对探测器信号进行读出。目前，针对气体探测器读出，有多款 ASIC 芯片可供选择，表 4.2 列举了当前可用于缪子成像实验的前端电子学 ASIC。

表 4.2 可用于缪子成像实验的读出 ASIC 及其参数

芯片名称	输出类型	达峰时间	噪声	最大测量电荷
PASA ^[14]	波形	160 ns	0.16 fC(25 pF)	150 fC
VMM ^[15]	峰值/时间	25 ns ~ 200 ns	0.8 fC(200 pF)	2 pC
AFTER ^[16]	波形	100 ns ~ 2 μ s	12 fC	600 fC
AGET ^[17]	波形	50 ns ~ 1 μ s	0.088 fC/pF	120 fC ~ 10 pC
STAGE ^[18]	波形	60 ns ~ 8 μ s	0.088 fC/pF	120 fC ~ 10 pC

4.3.2 前端电子学板介绍

通过第二章的分析,前端电子学单通道的信号范围为 $2.4 \text{ fC} \sim 95 \text{ fC}$, 其噪声需小于 0.8 fC ; 此外,前端电子学板还应提供触发功能。满足上述需求的前端电子学板,均可用于缪子成像实验。

目前,本文作者所在实验室开展了微结构气体探测器通用电子学前端读出模块 (FEC, Front End Card) 研究^[19-20], 其硬件功能满足宇宙线成像前端电子学所需功能。因此,将使用该板作为缪子成像原型系统的前端读出电子学板。本研究将对 FEC 板逻辑功能进行相应设计,使其满足宇宙线缪子成像实验需求。

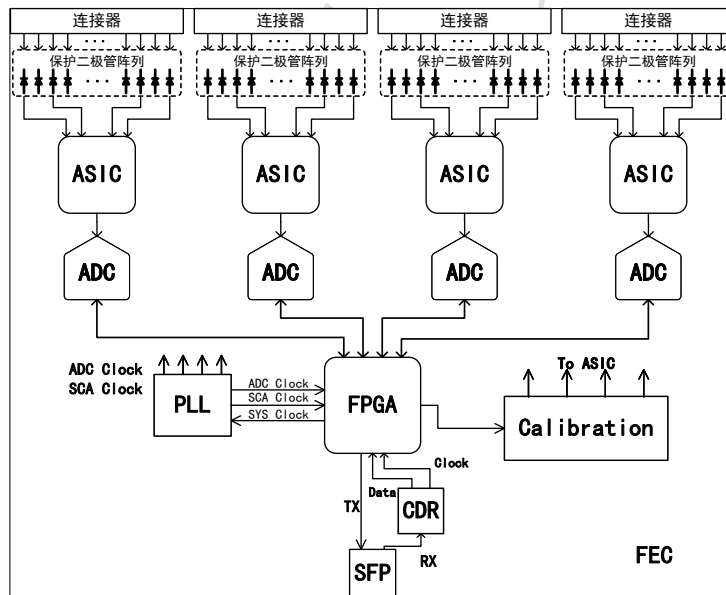


图 4.10 FEC 板主要模块示意图

图 4.10 所示为 FEC 板结构框图, 每块 FEC 板集成了 4 片 ASIC 芯片, 探测器信号通过高密连接器接入 FEC 板, 经过保护二极管阵列后送至 ASIC 进行放大、成形和采样。ASIC 模拟采样信号输出至一片单通道 ADC 芯片进行模数转换, 转换后的数据送至板上 FPGA (Xilinx A7-200T) 进行组包, 打包完成的数据通过光纤向后端电子学传输。(FEC 照片请见本论文附录 G)

下面对该 FEC 板关键部分进行分析与介绍：

1. 前端 ASIC

FEC 板使用了一款名为 AGET (ASIC for General Electronics for TPC) 的前端 ASIC，由法国原子能和替代能源委员会的 Saclay 研究中心为气体探测器读出研发。目前，AGET 芯片已经停产，经过调研，该研究所还有一款名为 STAGE (Second sTep AGEt) 的芯片可以使用，STAGE 是 AGET 的升级版本，在动态范围、达峰时间和抗辐照能力等方面进行了优化^[21]。AGET 芯片和 STAGE 芯片的封装兼容，在当前的实验条件下，针对宇宙线成像读出应用，AGET 和 STAGE 芯片是两个较为合适的选择。

STAGE 芯片结构如图 4.11 所示，每芯片有 64 个读出通道，通过配置参数可以选择读出正极性信号或者负极性信号。芯片每个通道由电荷灵敏前放（CSA, Charge Sensitive pre-Amplifier）、极零相消电路（PZC, Pole Zero Cancellation）、S&K 滤波器（Sallen-Key Filter）、开关电容阵列（SCA, Switched Capacitor Array）、甄别触发电路等部分构成。

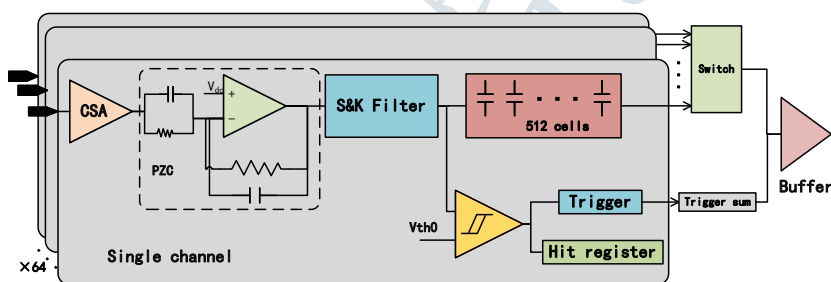


图 4.11 AGET / STAGE 芯片结构框图^[18]

芯片利用开关电容阵列对成形放大后的信号进行采样，采样频率在 1 MHz ~ 100 MHz 范围内可调。当采样信号和采样时钟撤去后，可以对模拟采样信号进行读出。在读出时钟和读控制信号的作用下，采样电容的信号被逐一驱动到一对差分脚上，需要一片 ADC 对模拟信号进行转换。

在采样阶段，STAGE 芯片还能提供触发信号，以便 FPGA 判断是否产生击中信号。每通道的成形信号除了被 SCA 采样之外，还将与一个可配置阈值的比较器进行比较，若信号超过阈值，则对应通道的击中寄存器（Hit channel register）将置 1。

芯片提供模拟和数字两种触发输出方式，在模拟输出模式中，芯片将模拟触发信号驱动至信号输出差分管脚，该触发信号的电压值大小与过阈通道数成正比。通过外部的 ADC 对模拟信号进行采样，根据该信号的幅值，可以判断在一定时间窗内的过阈通道数目，实现较精确的自触发功能。在数字输出模式中，通过配置寄存器控制，将芯片的过阈信号输出至一对专用 LVDS 管脚，将触发信号

送至 FPGA 中，FPGA 可以快速判断是否存在通道过阈。

综上，STAGE 芯片的关键参数如表4.3所示。

表 4.3 Stage 芯片关键性能参数

参数名称	数值
量程	120 fC (240 fC, 1 pC, 10 pC)
噪声	< 0.13 fC (120 fC 量程)
通道数	64
达峰时间	50 ns ~ 1 μ s (16 个值)
采样频率	1 MHz ~ 100 MHz
读出频率	20 MHz ~ 25 MHz
采样单元数目	512
计数率	< 1 kHz

2. 输入级保护

在气体探测器的读出中，输入级需要采用特殊设计，防止由于探测器打火造成电子学通道损坏。前端电子学保护电路结构如图 4.12所示，输入信号经过电阻后与一对保护二极管并联，再通过一个隔直电容接入芯片输入管脚。探测器正常工作情况下，输入级信号电压幅度小于二极管的正向导通电压，两个保护二极管均处于截止状态，探测器电流信号通过隔直电容后，被读出电子学芯片收集。若探测器发生打火现象，输入级电压幅值剧增，此时其中一个二极管导通，将隔直电容左侧电压钳位在 $-0.7\text{ V} \sim 0.7\text{ V}$ 之间，实现电路保护功能。

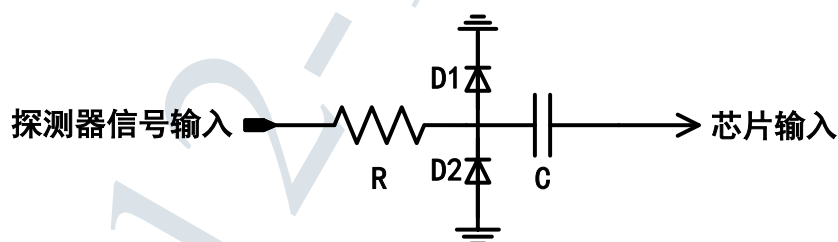


图 4.12 前端读出电子学输入级 ESD 保护电路结构

3. ADC 电路

STAGE 芯片内部完成了对 Micromegas 探测器信号的放大、成形和模拟采样，采样后的信号从一对差分脚输出。该信号的共模电压值可以通过芯片偏置电压管脚进行调节，其允许的电压值范围为 $1.5\text{ V} \sim 1.65\text{ V}$ ，差模电压范围为 $-1\text{ V} \sim 1\text{ V}$ 。根据芯片手册要求，需要使用 12 bits 以上、采样率超过 25 MHz 的 ADC。因此，FEC 板上设计了一片单通道 ADC AD9235^[22] 对 ASIC 模拟输出进

行采样。其最高采样率为 65 MSPS, 输入信号范围为 $1 V_{p-p} \sim 2 V_{p-p}$, 满足 ASIC 芯片读出需求。

4. FPGA

作为主控芯片, FPGA 主要完成芯片配置和控制、数据读出、触发产生和上传、时钟分发、数据打包发送、命令解析等功能。FEC 板上采用了 Xilinx 公司性价比较高的 Artix-7 系列 FPGA 作为前端电子学的主控芯片。

针对宇宙线缪子成像应用, 编码读出后每个前端电子学板可读出面积为 0.8 m^2 的 Micromegas 探测器, 按海平面附近缪子通量计算, 单个芯片的事例率约为 133Hz。考虑径迹测量系统的接收度, 信号事例率低, 且每个事例只会击中少量的探测器通道。由前文分析可得, Micromegas 探测器的电离信号分布宽度约为 $2 \sim 5$ 根条, 考虑宇宙线缪子斜入射的极端情况, 击中的探测器通道也不会超过 15 个。经过一定的通道数据筛选后, 宇宙线缪子事例的数据率约为 4.5 Mbps。因此, 该 FPGA 能满足缪子成像实验需求

5. 光纤通讯接口

FEC 设计有数据时钟恢复芯片 ADN2815^[23], 该芯片能从光纤链路中解出时钟和串行数据。其中, 时钟经由 FPGA 送至 PLL 芯片 AD9522^[24] 中, PLL 产生的时钟发送给 ASIC 和 ADC 作为采样和转换时钟; 串行数据直接输入到 FPGA, 通过 FPGA 完成串并转换和相应的命令解析。

4.3.3 前端电子学板逻辑功能设计

前端电子学的逻辑功能设计主要包括: ASIC 芯片配置、SCA 读写控制、时钟分发、命令解析、数据筛选组包、触发接收和上传等, 各部分功能框图如图 4.13 所示。其中芯片配置和命令解析属于常见功能, 本文不再详细介绍, 下面主要针对前端电子学的一些重要功能进行分析和设计。

1. 时钟分发

FEC 板上的 CDR 芯片将从光纤链路中, 解码出由后端电子学发送的串行时钟, 该时钟经过 FPGA 内部的 MMCM (Mixed-Mode Clock Manager)^[25] 分频后作为系统主时钟使用, 同时 FPGA 还将该时钟输出至 FEC 板上的 PLL 芯片作为参考时钟。FEC 板上的 PLL 将根据配置参数产生 SCA 采样时钟和 ADC 的工作时钟, 并将两个时钟送回 FPGA 作为控制 ASIC 采样和 ADC 采数逻辑的工作时钟。在保证 SCA 采样时钟和 ADC 时钟稳定性的前提下, 实现系统时钟同源。

2. 触发上传和接收

为了实现快速触发检测, 使用 ASIC 芯片的数字触发输出模式。当配置成自触发模式时, STAGE 芯片将过阈信号输出至一对差分信号管脚, 由触发模块进行检测, 若有芯片存在过阈信号, 则将产生一个触发信号并发送至后端电子学。

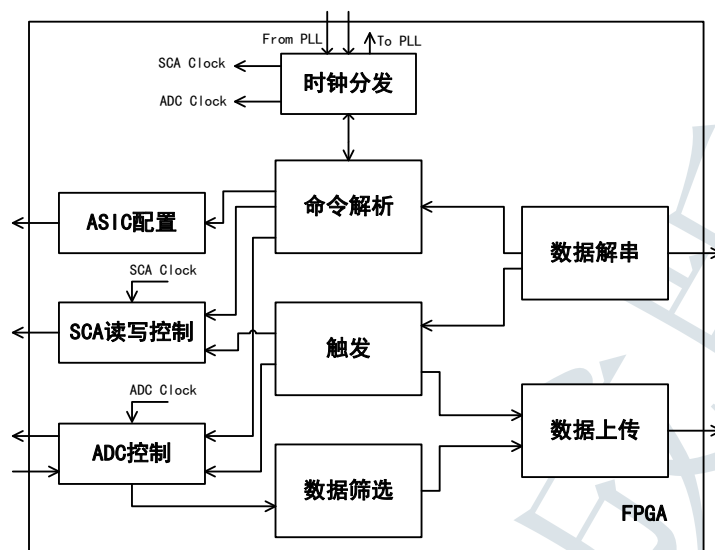


图 4.13 前端电子学逻辑设计框图

后端电子学接收到触发之后，将对触发进行判断，之后向所有的前端电子学下发触发信号。前端电子学的触发接收模块收到后端发来的触发信号后，停止芯片 SCA 的采样过程，开始对每个通道的 SCA 进行读出。

除此之外，FEC 板上还有一个接收外触发的接口，当该接口收到触发信号后，FEC 也将向后端电子学发送触发信号。

3. SCA 读写控制

当 ASIC 芯片初始化完成后，在 FPGA 的控制下，使能芯片的 SCA 写信号，此时在片外 PLL 提供的采样时钟驱动下，ASIC 芯片内部的 SCA 一直处于“写”状态。512 个采样电容处于循环采样模式，不断地对放大成形后的探测器信号进行采样，直到 FPGA 收到后端发来的触发信号。收到触发信号后，读写控制模块停止写 SCA，开始对 ASIC 采样信号进行读出。根据芯片工作模式，停止采样后，SCA 的指针指向下一个采样电容，该电容与之后的 511 个电容存储了前 512 个采样周期的成形信号波形。在读 SCA 信号和读时钟的控制下，SCA 中的信号波形将按照逐通道、逐电容的方式输出。在读出芯片信号的同时，开启 ADC 对模拟信号进行采样。

4. 数据筛选和上传

如前所述，宇宙线缪子信号击中位置稀疏，单次事例只会在少量探测器通道上产生感应电荷信号，并不是每片 ASIC 的所有通道都有击中信号。为了对采集到的数据进行进一步压缩，在前端电子学中先对数据进行过阈判断，只将过阈通道的数据传输至后端电子学。

不同的实验场合和探测器条件下，电子学噪声可能会不同，因此在每次实验前，先将阈值设置为 0，读回所有通道的数据，对其进行统计分析后，根据实验

所需数据筛选程度，向前端电子学板发送相应的阈值配置参数。事例数据筛选后，可以极大地减少前端电子学所采集的数据量，加快数据处理和分析工作。

FPGA 将采集到的数据按照自定义协议向后端电子学发送，通讯协议由包头帧、采样数据帧和包尾帧组成。其中包头帧包含了当前事例的触发号、时间戳和 CRC^[26] 校验信息，数据分析程序将根据触发号对齐不同前端电子学板的事例；采样数据帧包含芯片号、通道号、ADC 码值和 CRC 校验值；由于不同芯片过阈的通道数目不同，每次事例采样数据帧长度不同，因此使用包尾标志单次触发后，数据全部传输完成，包尾帧包含了包尾事例类型和相应的校验值。为了保持各个前端电子学板的触发号对齐，触发号由后端电子学发送至前端。前端电子学若没有过阈信号，也会上传包头和包尾信息，以便后端电子学对前端电子学数据进行处理。

5. 自动化刻度功能

根据不同的成像应用，缪子成像系统可能会使用数十块前端电子学板，为了保证前端电子学的均匀性，需要对每块前端电子学板进行刻度。由于实验中待刻度的电子学通道数较多，刻度电路要能自动化完成所有通道的测试。本文作者在之前的研究中曾开展自动刻度方案的研究^[27]，将其做适当改造后可以应用至 STAGE 芯片的刻度中。

如图 4.14 所示，STAGE 芯片提供两个刻度管脚，分别支持外接刻度电容和内置刻度电容两种方式。在刻度中，为了产生与真实探测器信号近似的负电荷脉冲，刻度电路需要产生负阶跃信号，并将其输入到电容的一端。设该阶跃信号的幅度为 ΔV ，刻度电容大小为 C_{cali} ，则在电容另一端将会感应出电荷量为 $Q = \Delta V \cdot C_{cali}$ 的负电荷。ASIC 芯片会对该信号产生响应，该响应与输入电荷关系即为芯片的刻度结果。

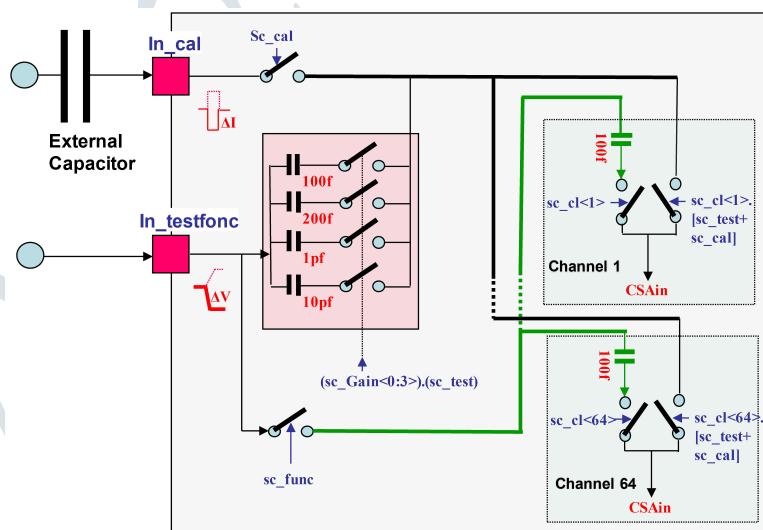


图 4.14 STAGE 芯片刻度管脚及其内部结构^[18]

图 4.15(a)所示为基于信号发生器的自动化刻度电路方案,在该方案中使用外接信号发生器产生所需的负阶跃信号。通过基于 C# 编写的测试软件对信号发生器进行控制,可以自动化地改变信号发生器的幅度,同时该软件还能采集芯片对应的数据,实现自动刻度功能。

图 4.15(b)所示为板上自动化刻度电路原理示意图,使用 DAC (Digital-to-Analog Converter) 产生稳定的直流电平,开关 S_1 断开时,该电压将会对电容 C_1 充电;当电容上的电压值稳定后,将开关 S_1 闭合,电容上的电荷将会快速的从开关流向地电位,从而产生一个负向的阶跃电压。该阶跃电压的下降时间为 $\tau = R_2 \cdot C_1$,常用的模拟开关导通电阻约为 $0.7 \Omega \sim 1.0 \Omega$,配合 1 nF 的电容可以产生下降沿为 1 ns 的阶跃脉冲。在刻度电路中使用一个低带宽的运放 Amp_1 增强 DAC 的驱动能力,使用一个高带宽的运放 Amp_2 将刻度信号驱动至各个芯片的刻度管脚。

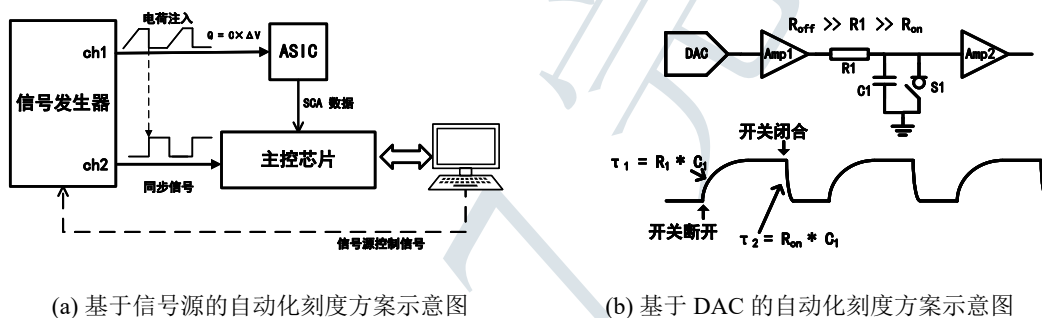


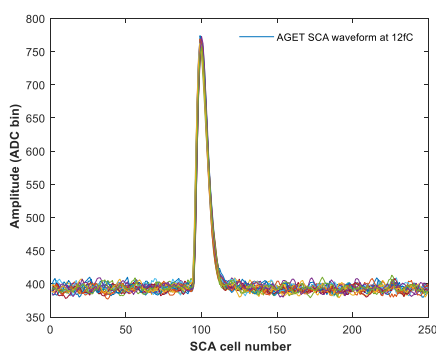
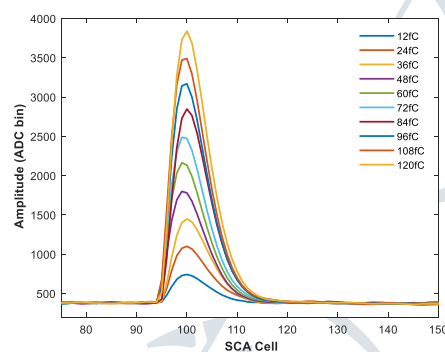
图 4.15 针对 STAGE 芯片的两种刻度方案示意图

4.3.4 前端电子学板测试

1. 电路功能测试

图 4.16所示为给定电荷输入条件下 STAGE 芯片记录的波形,芯片达峰时间配置为 $1 \mu\text{s}$, SCA 采样时钟设置为 5 MHz , SCA 读出时钟设置为 25 MHz 。从定性角度分析,由图 4.16(a)可得,对于相同电荷量,芯片不同的通道有较好的一致性,后文将对芯片的增益一致性进行定量分析;图 4.16(b)为不同电荷量输入条件下,同一电子学通道采样所得波形,结果表明对不同电荷量的信号,芯片均能产生响应。

图 4.17所示为输入电荷量为 18 fC 时,不同达峰时间条件下,芯片记录得到的信号波形。在测试中,SCA 的采样时钟设置为 100 MHz ,SCA 的读出时钟设置为 25 MHz 。图中所示结果验证了前端电子学芯片的达峰时间调节功能(16个达峰时间均能调节,选取了 5 个达峰时间进行绘图)。

(a) 单个芯片注入 $12fC$ 电荷量波形图

(b) 单个通道不同电荷量波形图

图 4.16 STAGE 芯片波形记录功能测试结果

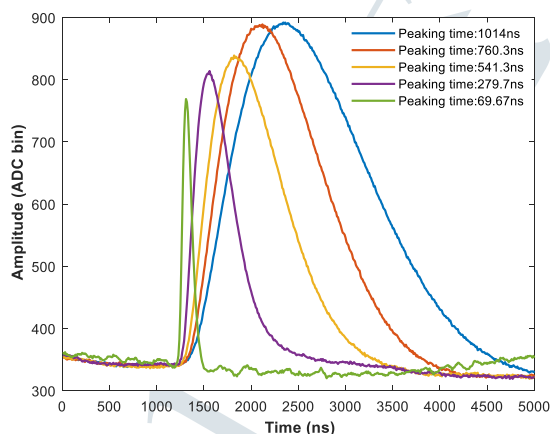


图 4.17 不同达峰时间测量得到的 STAGE 波形

2. 噪声测试

前端电子学噪声主要由 ASIC 芯片自身噪声和 ADC 噪声两部分构成，两部分噪声都会叠加在测试数据中，因此没有必要对两部分噪声分别进行测试。针对前端电子学噪声测试，在芯片空载的情况下向前端电子学板发送随机触发。数据处理程序通过采样结果，统计其基线分布，分析得到 STAGE 芯片的噪声。

芯片噪声测试结果如图 4.18所示，图 4.18(a)为对单个电子学通道基线进行统计的结果，使用正态分布对其进行拟合，拟合结果的标准差即为芯片的噪声。在宇宙线缪子成像实验中，根据基线统计结果的平均值和标准差设置相应的触发阈值。图 4.18(b)为同一块前端电子学板各个通道基线标准差的统计结果，在空载情况下，STAGE 芯片大部分通道的噪声小于 5 个 ADC 码值。

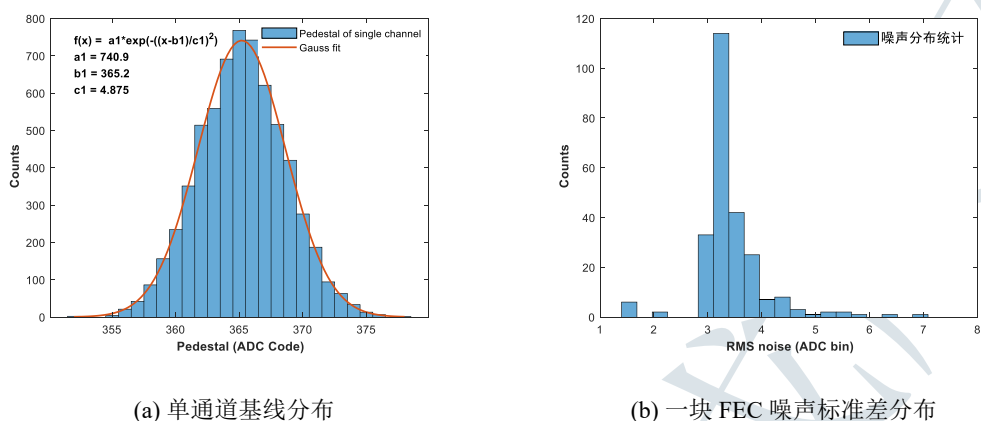


图 4.18 前端电子学板噪声测试结果

3. 芯片刻度

基于前文设计的自动刻度电路，使用信号源对单个前端电子学板进行刻度，得到如图 4.19所示的 STAGE 芯片刻度曲线。根据该刻度曲线，前端电子学板 ADC 码值和电荷量转换关系为 $Code_{ADC} = 28.7023 \times Charge + 28.4706$ 。根据这一结果，可以将图 4.18(b)测量得到的噪声换算成电荷量，超过 95% 通道的噪声标准差小于 0.2 fC ，满足缪子成像实验需求。

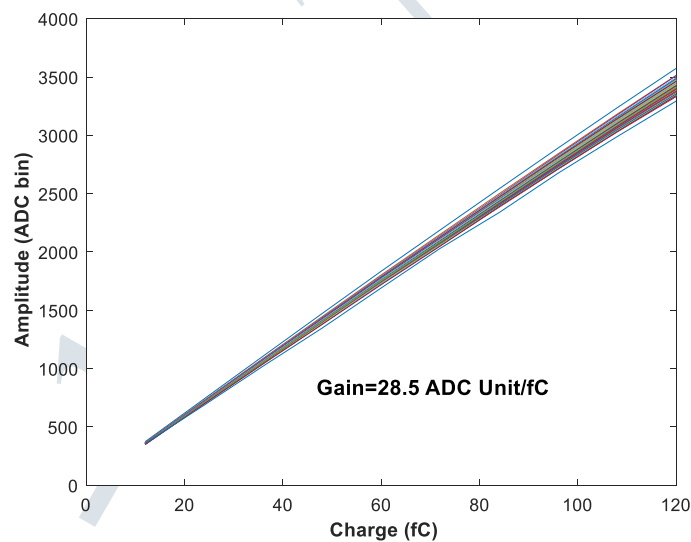


图 4.19 STAGE 芯片刻度结果

4.4 电子学系统联调

本节针对前文设计的前端电子学板和后端电子学板开展联调测试工作，测试内容包括电子学功能测试、接口性能测试和触发性能测试。

4.4.1 功能测试

在测试中，将后端电子学全部接口都接上前端电子学板，所有端口均能正确建立自定义协议的数据链路。图 4.20所示为使用后端电子学对 8 块前端电子学进行读出，通过读出数据分析所得的电子学噪声分布结果。在不同触发模式下均能正确读回所有前端电子学板数据，长时间测试结果表明，前端电子学和后端电子学联合工作正常。

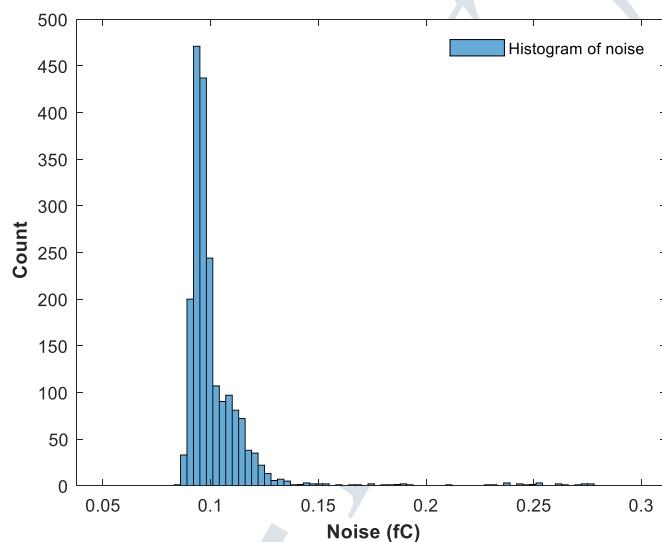


图 4.20 后端电子学对 8 块前端电子学噪声测试统计结果

4.4.2 误码率测试

前端电子学板和后端电子学板之间通过自定义协议光纤进行通讯，为了验证接口和协议的性能，针对该接口开展误码率测试。图 4.21为误码率测试模块示意图，使用多项式 $X^{31} + X^{28} + 1$ 作为伪随机数序列产生多项式，图中 PRBS Gen 模块将产生连续的伪随机数序列。后端电子学板产生的伪随机数序列通过下行链路发送至前端电子学板，通过 PRBS Check 模块对输入的数据进行校验，并对校验的误码数进行计数。同时，前端电子学中的 PRBS Gen 模块将产生伪随机数序列对上行链路进行测试。使用 Xilinx FPGA 提供的 VIO 功能对 PRBS 测试的产生和停止进行控制，并且通过 VIO 监控传输误码数。

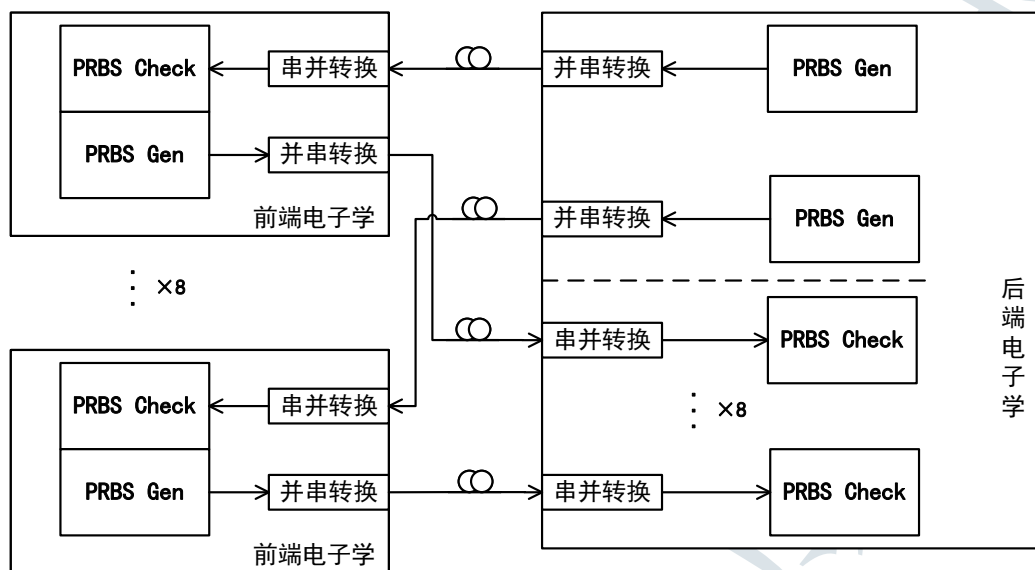


图 4.21 误码率测试示意图

如本文4.2.2小节所述，下行链路的带宽为 200 Mbps，上行链路的带宽为 400 Mbps，一共测试了 208 个小时，下行链路共传输 1.498×10^{14} bits 数据，上行链路共传输 2.995×10^{14} bits 数据，没有检测到误码。根据换算关系^[28-29]，在 95% 的置信度下，下行链路的误码率小于 2×10^{-14} ，上行链路的误码率小于 1×10^{-14} 。

从宇宙线成像应用的角度考虑，散射成像的时间为十几分钟到几小时不等，透射成像的时间多为几天。因此，上述误码率和稳定性测试说明，读出电子学能够满足缪子成像实验的需求。

4.4.3 触发性能测试

在系统设计中，为了保证不同前端电子学板同步地采集数据，系统触发信号由后端电子学向前端电子学发送。在成像应用中，每个读出电子学板的事例是由同一个缪子穿透不同探测器产生的，因此要求每个前端电子学板都要对触发信号进行响应，即不能丢触发。

图 4.22所示为不同前端电子学板在在同一个触发信号到来的时刻测量得到的波形，芯片成形时间设置为 69.67 ns，SCA 采样率设置为 100 MHz。长时间测试结果表明所有前端电子学板均能正确响应触发，且触发响应时间差小于 10 ns。对于缪子成像应用，触发功能和触发精度满足实验需求。

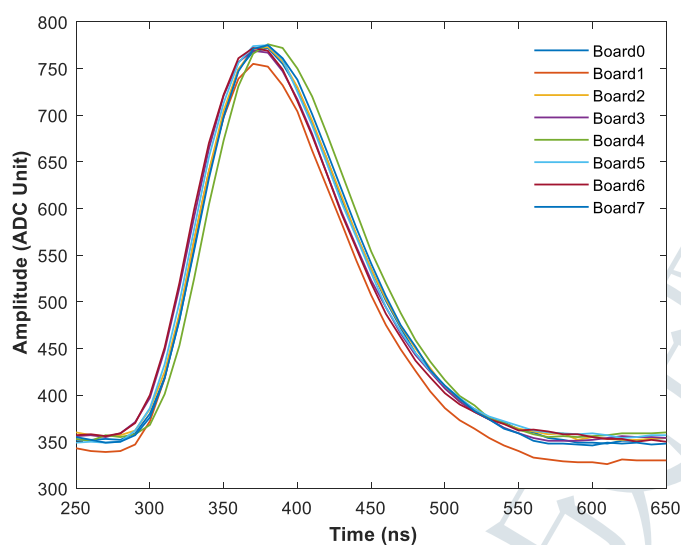


图 4.22 不同前端电子学板测量得到的波形

4.5 本章小结

本章根据 Micromegas 探测器信号特点和缪子成像读出需求，设计了一套通用、可扩展的读出电子学架构。

后端电子学可以根据成像实验的规模进行扩展和剪裁，并根据不同的应用场合，设计面向服务器端的接口和面向小型工作站的通用接口。可以根据散射成像和透射成像对功耗的要求，选择不同的接口进行读出。前端电子学板通讯采用自定义协议的光纤接口，其数据率和稳定性能满足缪子成像实验需求。

前端电子学目前采用实验室已有的微结构气体探测器通用读出模块，本研究对其进行相应改造以适应当前缪子成像实验；配合编码读出板，单个前端模块可完成 2048 路探测器通道读出，其动态范围和噪声性能满足实验需求。

经过系统联调测试，电子学系统工作稳定，能够应用于缪子成像实验中。

参考文献

- [1] Xilinx Inc. 7 series FPGAs GTP transceivers, user guide (UG482)[M]. Xilinx Inc., 2016.
- [2] Xilinx Inc. 7 series FPGAs GTX GTH transceivers user guide (UG476)[M]. Xilinx Inc., 2018.
- [3] 李诚. PandaX-III 实验读出电子学系统研究[EB/OL]. 中国科学技术大学(2018)[2021-01-10]. <https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&dbname=CDFDLA-ST2018&filename=1018096075.nh&v=48gAW2MTW0NsFtSdMRRyo8rszS4eDjDzHTD7i>

- JVCdd%25mmd2Fv1hudnxuIJWWnQ%25mmd2BW91B%25mmd2B6.
- [4] Cypress Semiconductor Corporation. CYUSB301x/CYUSB201x, EZ-USB® FX3: Super-Speed USB controller[Z].
- [5] TAKUBO Y, CLARK A, ENDO M, et al. Development of SiTCP based DAQ system of double-sided silicon strip super-module[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 699: 116-119[2021-05-20]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900212003877>. DOI: 10.1016/j.nima.2012.04.032.
- [6] WU W. FELIX: the new detector interface for the ATLAS experiment[J/OL]. arXiv:1806.10667 [hep-ex, physics:physics][2019-07-08]. <http://arxiv.org/abs/1806.10667>.
- [7] 元光远, 沈仲弢, 王宇, 等. 基于 FELIX 的微结构气体探测器读出电子学系统设计[J/OL]. 原子能科学技术, , 54(6): 1034-1040[2020-12-21]. <http://www.aest.org.cn/CN/abstract/abstract20414.shtml>. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0043.
- [8] 元光远. 基于 FELIX 的微结构气体探测器通用读出系统研究[EB/OL]. 中国科学技术大学(2019). <https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&dbname=CDFDLAST2021&filename=1020098358.nh&v=FIW6DGxUoWZwibVMF3EGhqXA5FYT1somK4uw7VVF9zd7UHGrvXLgQeo7Lle%25mmd2F3OFz>.
- [9] FORSTER R. Manchester encoding: opposing definitions resolved[J/OL]. Engineering Science & Education Journal, 9(6): 278-280[2021-03-24]. https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/esej_20000609. DOI: 10.1049/esej:20000609.
- [10] GI LEE B, KIM S C. Introduction to self synchronous scrambling[M/OL]//GI LEE B, KIM S C. Telecommunication Networks and Computer Systems: Scrambling Techniques for Digital Transmission. London: Springer, 1994: 345-350[2021-03-24]. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3231-8_17.
- [11] Xilinx Inc. 7 series product selection guide[M/OL]. Xilinx Inc., 2020[2021-03-21]. <https://www.xilinx.com/support/documentation/selection-guides/7-series-product-selection-guide.pdf>.
- [12] FX E U. Designing with the EZ-USB® FX3™ slave FIFO interface[J]. (1): 68.
- [13] RICCARDI D, NOVELLINI P. An attribute-programmable PRBS generator and checker[J]. 8.
- [14] SOLTVEIT H K, STACHEL J, BRAUN-MUNZINGER P, et al. The PreAmplifier ShAper for the ALICE TPC detector[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 676: 106-119 [2021-03-20]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900212001660>. DOI: 10.1016/j.nima.2012.02.012.
- [15] METCALFE J, DE GERONIMO G, FRIED J, et al. Design and characterization of the VMM1

- ASIC for micropattern gas detectors[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 732: 526-529[2021-03-20]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213011935>. DOI: 10.1016/j.nima.2013.07.092.
- [16] BARON P, DELAGNES E, CALVET D, et al. AFTER, an ASIC for the readout of the large t2k time projection chambers.[C/OL]//2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record: volume 3. 2007: 1865-1872. DOI: 10.1109/NSSMIC.2007.4436521.
- [17] ANVAR S, BARON P, BLANK B, et al. AGET, the GET front-end ASIC, for the readout of the time projection chambers used in nuclear physic experiments[C/OL]//2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2011: 745-749. DOI: 10.1109/NSSMIC.2011.6154095.
- [18] P. Baron, E. Delagnes. STAGE, a front end ASIC for active time projection chamber data sheet v1.0[M]. IRFU/CEA Saclay, 2019.
- [19] ZHU D, LIU S, FENG C, et al. Development of the front-end electronics for PandaX-III prototype TPC[J/OL]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 66(7): 1123-1129. DOI: 10.1109/TNS.2019.2907125.
- [20] 董家宁. PandaX-III 实验前端读出电子学方法研究[EB/OL]. 中国科学技术大学(2017)[2020-07-14]. <https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&dbname=CDFDLAST2017&filename=1017192023.nh&v=MTc2MDIxTHV4WVM3RGgxVDNxVHJXTTFGckNVUjdxZlIPZHJGeS9uVWI3TVZGMjZHYkt4SE5IT3JKRWJQSvI4ZVg=>.
- [21] Pascal Baron, David Baudin, Eric Delagnes. ASTRE: the upgraded version of AGET ASIC [EB/OL]. TALENCE, France(2018-10)[2021-03-20]. https://indico.in2p3.fr/event/17431/contributions/65827/attachments/50808/65007/ASTRE-GWS-bordeaux_.pdf.
- [22] AD9235 datasheet and product info | analog devices[EB/OL]. [2021-03-21]. <https://www.analog.com/en/products/ad9235.html>.
- [23] Analog Devices, Inc. ADN2815 continuous rate 10 mb/s to 1.25 gb/s clock and data recovery IC[Z]. 2014.
- [24] AD9522-3 datasheet and product info | analog devices[EB/OL]. [2021-03-22]. <https://www.analog.com/en/products/ad9522-3.html#product-overview>.
- [25] Xilinx Inc. 7 series FPGAs clocking resources user guide (UG472)[M]. Xilinx Inc., 2018.
- [26] SCHMIDT T. CRC generating and checking[J]. 24.
- [27] WANG Y, LIU S, SHEN Z, et al. Auto calibration method for the front-end electronics in digital hadron calorimeter[C/OL]//2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). 2020: 1-5. DOI: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128494.

- [28] Marcus Mueller, Ransom Stephens, Russ McHugh. Total jitter measurement at low probability levels, using optimized BERT scan method[EB/OL]. [2019-03-09]. <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-2933EN.pdf>.
- [29] JitterLabs —BER confidence-level calculator[EB/OL]. [2021-03-25]. <https://www.jitterlabs.com/support/calculators/ber-confidence-level-calculator>.

第5章 缪子成像原型系统搭建与成像实验

本章利用前文设计的编码读出板和读出电子学,搭建缪子成像实验样机,并开展了宇宙线缪子成像实验研究。其中散射成像样机使用8层 Micromegas 探测器,透射成像样机使用4层探测器。利用散射成像装置,本研究开展了厘米量级的成像实验和物质区分实验;并根据试验结果,对 PoCA 算法进行优化,使得成像结果更加清晰。利用透射成像装置,本研究对中国科学技术大学教学科研楼(地空楼)展开测试,验证了该装置对大尺度物质的成像能力。

5.1 缪子成像样机搭建

缪子成像实验的核心是径迹测量,其精确与否将直接影响成像质量。为了更好地排除噪声等因素对径迹测量的影响,单个径迹测量模块由四层探测器组成。在实验中,若有一层探测器出现干扰信号,利用其他层的击中位置拟合,可以将其排除。目前,15 cm×15 cm 探测器制作工艺成熟、性能稳定,因此在本论文中使用该尺寸探测器搭建原型系统,并开展相应的成像实验。

单个探测器可以实现 XY 两个维度的测量,Z 方向的位置由搭建成像平台时确定。探测器每个维度有384个阳极读出通道,采用第三章设计的编码读出板,每个维度的探测器通道被编码为64路电子学通道,由一片 ASIC 芯片读出。每个前端电子学板有四片 ASIC 芯片,读出两个探测器。

5.1.1 散射成像样机

散射成像样机由两组径迹测量模块、四块前端电子学板、一块后端电子学板、服务器、塑料闪烁体、触发插件以及高压插件组成,上游径迹测量模块和下游径迹测量模块之间为待成像区域,其结构如图5.1所示。宇宙线缪子穿过探测器区域时,上下两层塑料闪烁体产生闪烁光,被 PMT (PhotoMultiplier Tube) 读出后送至甄别器和符合插件。符合后的信号作为系统的外触发信号,后端电子学板接收到外触发信号后,向前端电子学发送相应的命令,并读回所有前端电子学板的数据。数据按照第四章所述方式处理后,传输至服务器。在服务器端,利用 Python 和 CERN 开发的科学数据处理软件包 ROOT^[1],对采集数据进行实时解包和分析。

图5.2所示为散射成像实验平台照片,将竖直向上方向定义为 Z 轴正方向。根据探测器读出条位置关系设置右手坐标系,采集数据按照该坐标系进行解码和分析,坐标轴方向如图右上角所示,后续散射成像实验均基于该装置展开。

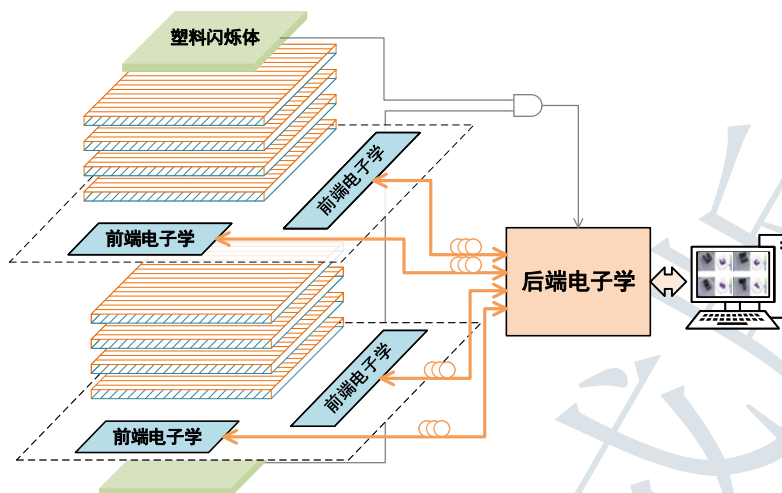


图 5.1 散射成像实验平台示意图



图 5.2 散射成像实验样机

5.1.2 透射成像样机

透射成像装置使用一个径迹测量模块，其读出电子学与散射成像装置一致。径迹测量模块装在一个具有旋转轴的小车上，可以根据待测物体的高度和距离调节相应的倾角，使得径迹系统的视场覆盖待测物体。搭建完成的散射成像装置如图 5.3 所示。前端电子学板通过相应的机械结构安装在支架内侧，探测器信号通过柔性编码连接器送至前端电子学板，使用长光纤将前、后端电子学板相连。



图 5.3 透射成像实验样机

5.2 缪子成像平台测试

在成像实验过程中，分别使用了哈密顿回路编码板和旧方案编码板对探测器信号进行编码。针对两种编码方案，分别开展了相应的测试。测试中，探测器阳极接地电位，丝网电压和漂移极电压分别设置为 -540V 和 -720V 。

5.2.1 噪声测试

将前端电子学阈值设置为 0，利用随机触发方式采集数据。对采集到的基线数据进行统计，基线分布的标准差即为系统噪声。前端电子学板的噪声来源可以分为三个部分：一是前端板电路和芯片引入的噪声，这部分噪声可以使用屏蔽装置将其降至最低；二是由于 ASIC 芯片采样电容不均匀造成的噪声，这部分噪声相较于其他噪声小很多；三是由于编码转接板和探测器电容带来的噪声，不同的编码方案引入的探测器电容不同，其噪声值也不同。由上一章测试结果可得，芯片空载时噪声最大值为 0.2 fC ，即前两部分噪声占比很小。

图 5.4 所示为直接读出方案、两种编码读出方案和前端电子学板空载 4 种测

试条件下噪声分布结果。与前端电子学板自身噪声相比，直接读出方案每通道的噪声增大了 0.22 fC ，这部分噪声是转接板 PCB 布线电容和单通道探测器电容引入的。经过编码读出方案后，电子学噪声均增加，与前文分析结果一致。

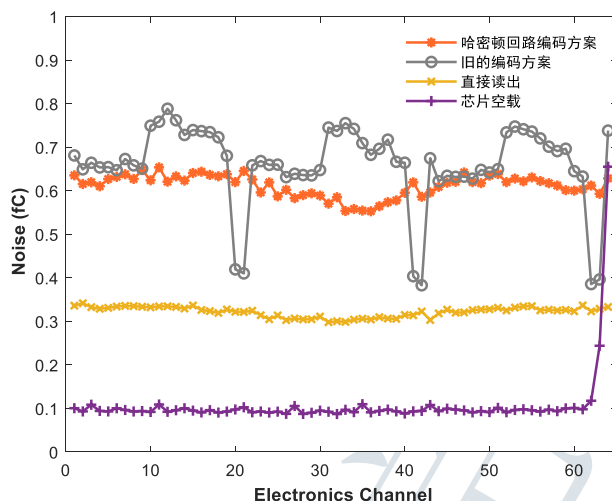


图 5.4 两种编码方案、直接连接和空载条件下电子学噪声分布

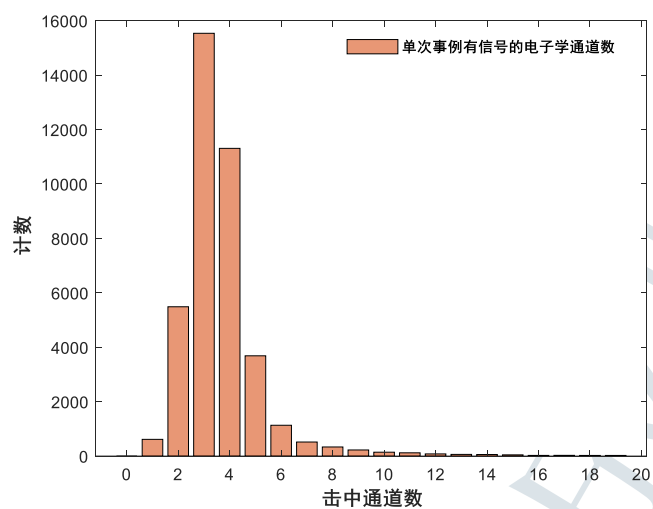
与旧的编码方案相比，基于哈密顿回路的编码方案带来的电子学噪声更加均匀。使用其对探测器进行读出，不同通道性能一致性将会更好。两种编码方案的电子学噪声均小于 0.8 fC ，满足缪子成像实验对电子学噪声的需求。后续实验将根据测量得到的噪声，设置相应的数据筛选阈值。

5.2.2 解码率测试

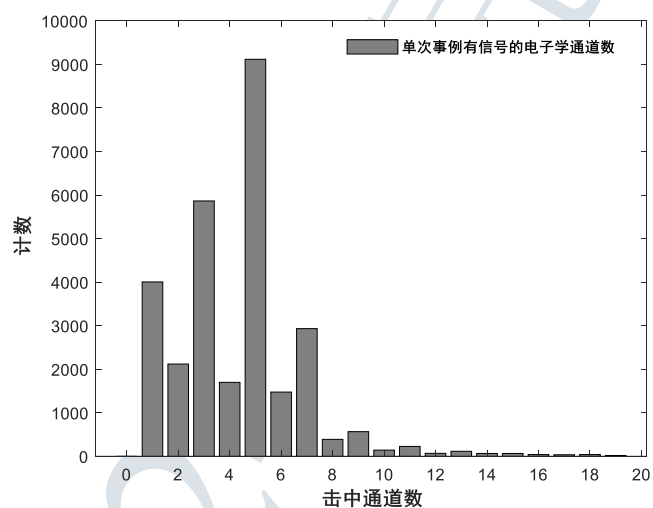
与直接读出方式相比，编码读出方案通过特定的方式，对探测器击中信息进行压缩，压缩过程可能会对探测器读出性能造成影响。根据第三章分析，旧的编码方案会丢失探测器击中信息，可能造成解码结果的不确定性。针对目前使用的探测器，基于哈密顿回路的编码方案没有损失任何的探测器击中信息，理论上能够完全正确解码。

然而，实验中存在环境噪声和探测器打火等情况，可能会对解码过程造成干扰。为了验证编码读出方案对实验的影响，对两种编码读出方案的解码能力进行了测试。由第三章解码算法可得，解码的结果只有两种情况，成功解码或只留下单个电子学通道。后者将会对成像系统读出造成影响，使得径迹探测效率降低。

图 5.5 所示为单次事例中，成功解码的电子学通道数目分布图。若某次事例只有一个电子学通道有信号，也将其记录下来作为单通道事例。由第三章解码算法可知，成功解码的条件之一是至少有两个电子学通道有击中。故只有单根条有击中，意味着该事例无法独立解码。



(a) 哈密顿回路编码方案



(b) 旧的编码方案

图 5.5 单次事例有信号的电子学通道数统计

图 5.5(a)为基于哈密顿回路编码方案的统计结果，只有少量的事例不能被正确解码，解码成功率为 98.4%。这部分单通道事例可能是由于垂直入射缪子产生的原初电离扩散较小造成，也可能是噪声过阈造成。该编码方案造成的击中信息损失小于 1.6%，能满足宇宙线缪子成像实验需求。

图 5.5(b)所示为旧的编码读出方案的电子学解码通道数统计，由于其噪声更大，且通道间噪声分布不均匀，有 13% 的单通道击中事例。这部分事例缺失会造成宇宙线缪子有效事例数减少，使成像时间变长。此外，由于编码方案的特点，部分 4 根探测器读出条击中的事例结果可能会编码为 3 个电子学通道，6 根探测

器读出条击中事例可能会编码为 5 个电子学通道。因此，在统计图中 3 个通道数和 5 个通道数位置对应的计数值更大。

在实验中，虽然少量的单个通道击中事例无法独立解码，但是可以结合其他位置探测器的击中信息进行反推。对于某一芯片的单通道击中事例，其对应的探测器通道有多种可能性。为了将其唯一确定，提取出所有正确解码层的击中位置，利用其他层的击中信息进行线性拟合，通过拟合后的直线反推至单个通道击中事例所在层，辅助该事例解码。即针对少量无法解码的事例，可以通过其他层提供的额外信息进行解码。

5.2.3 位置分辨率测试

在缪子成像实验中，位置分辨率的高低将决定系统对径迹测量的精确程度。由第二章分析可得，位置分辨率越好的探测器可以在更短时间内完成成像，同时由于径迹测量误差带来的错误重建点也更少。

系统位置分辨率计算方法示意图如图 5.6 所示，以计算第 i 层探测器位置分辨率为例。由于气体探测器物质的量极小，宇宙线缪子穿过探测器的径迹可视为一条直线。先挑选第 i 层探测器有击中的事例，并使用其他层探测器的击中位置进行线性拟合。利用线性拟合结果，反推得到第 i 层探测器的拟合击中位置 x_{fit} 。记拟合击中位置和探测器记录击中位置之差为 Δx_i ，则 $\Delta x_i = x_{fit} - x_{hit}$ 。对大量的宇宙线径迹进行统计，可以得到 Δx_i 的分布，记 Δx_i 分布的标准差为 $\sigma(\Delta x_i)$ 。由于每层探测器击中位置晃动的分布独立，因此 $\sigma^2(\Delta x_i) = \sigma^2(x_{fit}) + \sigma^2(x_{hit})$ ，其中 $\sigma(x_{hit})$ 为第 i 层探测器记录击中位置的晃动，即为第 i 层探测器的位置分辨率； $\sigma(x_{fit})$ 为拟合得到击中位置的晃动，由其他探测器的位置分辨率和探测器间距决定。

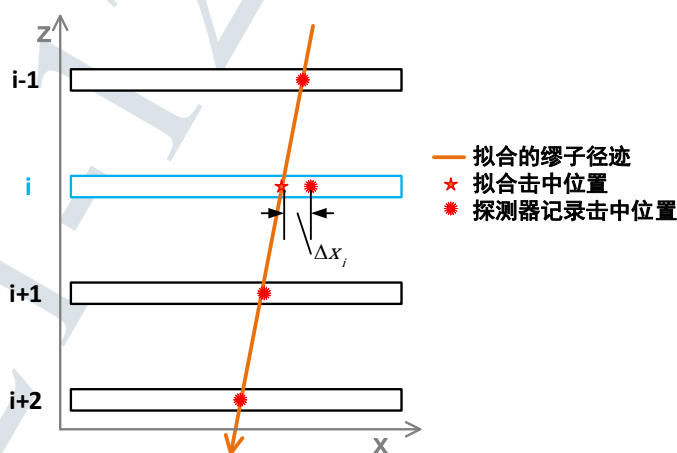


图 5.6 成像系统位置分辨计算方法示意图

在缪子成像应用中,对缪子径迹进行重建也是使用直线拟合方法。因此,使用 $\sigma(\Delta x_i)$ 作为衡量位置分辨率指标,比使用 $\sigma(\Delta x_{hit})$ 更为合适(探测器自身的位置分辨 $\sigma(\Delta x_{hit})$ 计算方法请见附录C)。

除了位置分辨率之外,还要对探测器位置进行修正,尽可能减少由拟合带来的径迹分辨误差。在探测器安装过程中,由于机械结构的加工精度有限,不可避免会造成每个探测器安装位置偏差,这将造成探测器记录的位置和实际缪子击中位置之间有固定的偏差,这一偏差将会造成前文计算的 $\sigma(\Delta x_{fit})$ 偏大。

针对目前实验使用的缪子成像平台,本论文实现了两种位置修正的方法。第一种是利用每层计算所得 $\sigma(\Delta x_i)$, 求其平均值作为探测器位置修正值,经过多次迭代计算得到的 $\overline{\Delta x_i}$ 即为所求。第二种方案是利用梯度下降法^[2-4],在该算法中定义损失函数为 $L = \sum_{i=1}^M \left[\sum_{j=1}^8 (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2) \right]$, L 为所有事例的击中位置与拟合位置之差进行平方求和的结果;当探测器位置修正后,损失函数达到最小值,因此利用梯度下降法可以将位置偏移修正至最小(由于该方法不属于本研究重点,具体公式推导过程和算法详见附录D)。针对第三章设计的两种编码读出板,下面将对其进行相应的位置分辨率分析。

图 5.7所示为利用旧编码读出板对探测器信号进行编码后,根据读出电子学数据分析所得探测器位置分辨率结果。在数据处理中,对不同角度的事例单独计算,随着缪子入射角增加,其原初电离位置的不确定性增加,因此探测器的位置分辨率变差,这与之前的研究结果相吻合^[5-6]。位于径迹系统外侧的探测器,距离拟合中心距离较远,拟合的微小偏差将会被放大,因此其位置分辨率会变差。

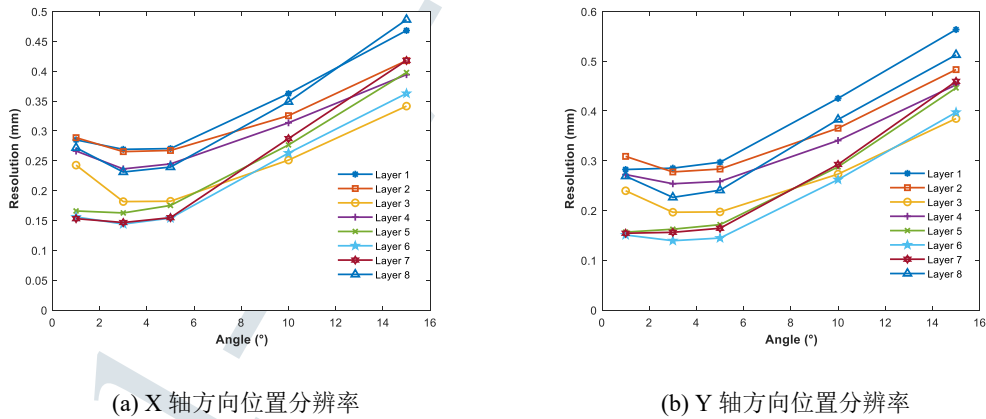
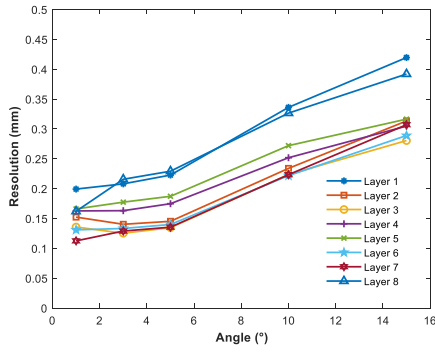
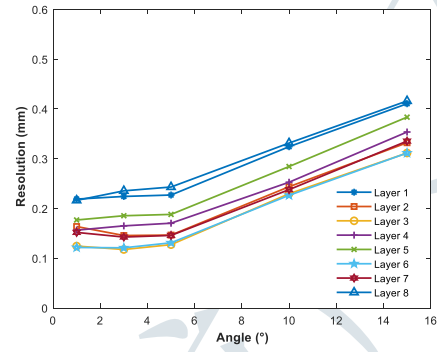


图 5.7 旧编码方案对探测器进行读出得到的位置分辨率结果

图 5.8所示为使用基于哈密顿回路编码板,测量所得探测器位置分辨率结果。相较于旧的编码方案,使用哈密顿回路编码方案位置分辨率更高。对于小角度入射缪子,最内层位置分辨率为 $110 \mu\text{m}$, 满足第二章分析所需的位置分辨率。



(a) X 轴方向位置分辨率

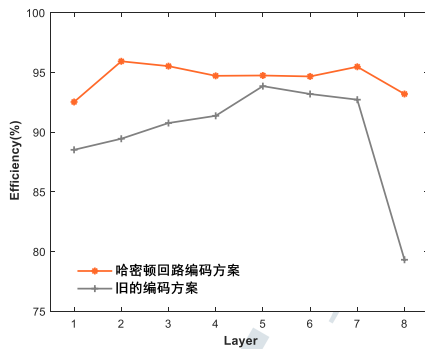


(b) Y 轴方向位置分辨率

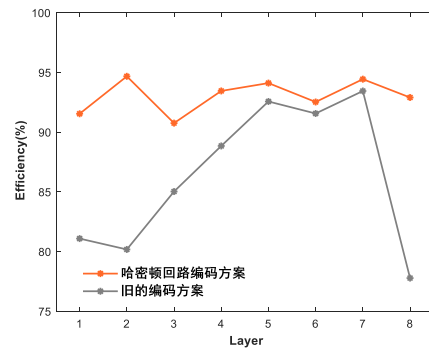
图 5.8 基于哈密顿回路编码方案测量到探测器位置分辨率结果

5.2.4 效率测试

效率计算方法也是利用其他层探测器击中信息进行反推，以计算第 i 层探测器效率为例。除第 i 层外，将其他层有击中的事例挑选出，并对其记录的缪子径迹进行拟合，拟合后反推得到第 i 层探测器的理论击中位置 x_{fit} 。设定两个计数器 $N_{hit|i}$ 和 N_{total} ，分别表示第 i 层有击中的事例数和总事例数。设置效率计算最大允许偏差范围为 Δx ，若第 i 层探测器的实际击中位置落在 $x_{fit} \pm \Delta x$ 的空间范围内，则 $N_{hit|i}$ 计数器加 1。对所有事例遍历后，第 i 层探测器的效率为 $N_{hit|i} / N_{total}$ 。



(a) X 维度



(b) Y 维度

图 5.9 探测器效率测试结果

图 5.9 所示为使用两种编码方案测量到的探测器效率，其中旧编码方案存在解码不确定性，一些事例重建会出现在错误的位置。此外，由于旧编码方案中部分电子学通道噪声相较于其他通道更大，解码成功率降低，因此效率有所损失。基于哈密顿回路的编码方案均匀性较好，除了第一层和最后一层外，X 维度探测

效率为 95%。由于 Y 维度读出条在 X 维度读出条下方，测量到的效率略低，但也在 90% 以上。

在成像实验中，4 层探测器中若有 3 层及以上的击中信号，即可作为有效事例。按此标准，两种编码方案对应的径迹重建效率如表 5.1 所示。哈密顿回路编码方案上、下游径迹模块重建效率均好于 95%，满足成像实验需求。

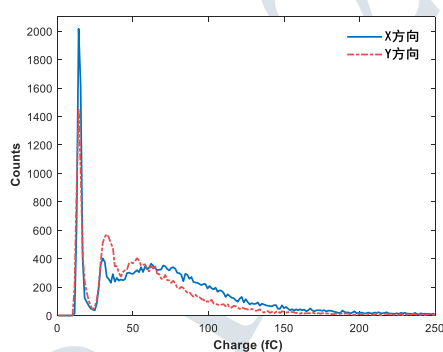
表 5.1 两种编码方案测得径迹重建率结果

编码方案	上游	下游
哈密顿回路方案	95.5%	96.0%
旧的编码方案	83.0%	89.5%

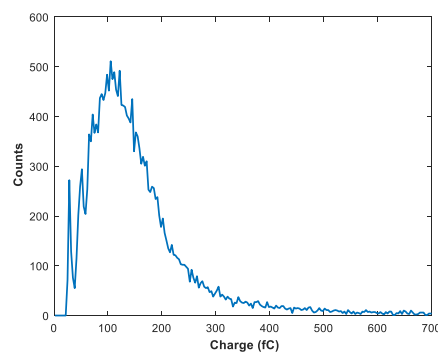
5.2.5 宇宙线沉积能量测试

实验中，对击中位置重建主要使用电荷重心法。因此，需对读出电子学测量到的宇宙线沉积能量进行测试。每个宇宙线事例会在 X 和 Y 两个维度的读出条上产生感应信号，其沉积能量产生的电荷量为两个维度所测电荷量之和。在实验中，电子学直接获取到的信息是电荷量，故在下面的数据处理中，使用电子学通道测量的电荷量表示宇宙线缪子沉积能量（将该值除以探测器增益后乘以平均电离能，即为宇宙线缪子在探测器中沉积能量值。对于电荷重心法而言，无需将其转换为能量坐标）。

图 5.10 为使用旧编码方案，对宇宙线缪子事例产生的感应电荷进行测量的结果。为了排除噪声和探测器打火影响，在数据处理中只记录成功解码通道和单个通道击中情况下的电荷量。



(a) 两个维度分别测量电荷量



(b) 两个维度电荷量相加

图 5.10 旧编码方案对测量电荷量进行重建

图 5.10(a) 为两个维度读出电子学分别测量的电荷量，电荷量分布在 0 附近有一个峰值，这是由于单个通道击中事例造成的。图 5.10(b) 为两个维度所测事

例电荷量的加和, 由于未成功解码事例带来的电荷量峰值减小, 说明在一个维度出现不能解码的情况下, 另一个维度仍能正常解码。

测量结果显示, 电荷量分布的主体符合郎道分布, 说明读出电子学正常工作。但存在电荷测量错误的情况, 会对位置重建造成影响。

使用基于哈密顿回路编码板, 读出电子学测量得到的宇宙线事例产生的电荷量分布如图 5.11 所示。图 5.11(a) 所示电荷量分布为两个维度分别测量所得。相较于旧编码方案, 哈密顿回路编码方案所测电荷量分布没有错误值。

由于 Y 方向读出条在 X 方向读出条下方, 其测量到的电荷量也更小, 故 Y 方向能谱的最可几值小于 X 方向能谱的最可几值, 这与 5.2.4 中效率测试的结果一致。图 5.11(b) 为两个维度电荷量加和的结果, 哈密顿回路的编码方案没有对电荷量测量造成影响, 读出电子学能满足宇宙线成像电荷测量需求。

在图 5.11 中, 单个维度沉积的能量最大值为 300 fC , 由多个击中条的电荷量叠加而得。图中没有出现能谱堆积的情况, 说明读出电子学动态范围能满足实验需求。

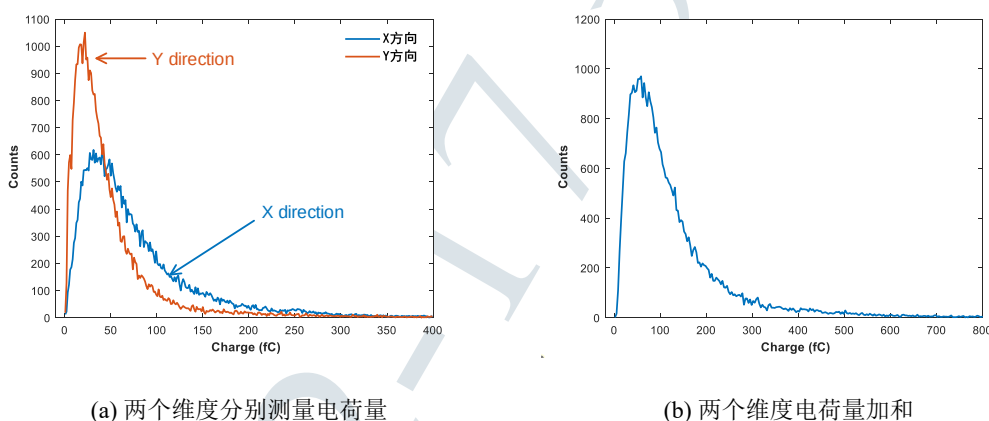


图 5.11 基于哈密顿回路编码方案对测量电荷量进行重建

5.3 散射成像实验

前文针对缪子散射平台开展了相应的性能测试, 验证了成像装置及读出电子学能满足缪子成像实验的需求, 本节将基于该装置开展散射成像实验。

5.3.1 散射成像算法分析

针对缪子成像, 国际上已经发展出多种算法, 比较主流的算法有最近邻点算法 (PoCA)^[7]、最大似然算法 (ML, Maximum Likelihood)^[7]、最大似然和位移算法 (MLSD, Maximum Likelihood Scattering and Displacement)^[8]、基于贝叶斯估计的

最大后验算法 (MAP, Maximum A Posteriori)^[9] 等。针对缪子在物质中的多次库仑散射过程，不同算法做了相应的优化和近似，其计算性能与结果准确度也不同。其中 PoCA 算法计算速度最快，成像结果误差较其他击中算法更大。

由于成像算法并不是本研究的重点内容，因此本文采用成像速度最快的 PoCA 算法对数据进行处理（PoCA 算法的计算过程详见附录E）。当成像系统位置分辨率足够好时，最简单的算法也能实现较好的成像效果。

由第一章介绍成像基本原理可得，在缪子散射成像中，缪子会多次和物质发生库仑散射，总散射角为其路径上所有散射角的叠加值。如图 5.12 所示，图中第 i 条缪子经过了像元 f_3, f_m, f_n, f_k ，因此其散射角为缪子与这四个像元发生库仑散射后的叠加值。

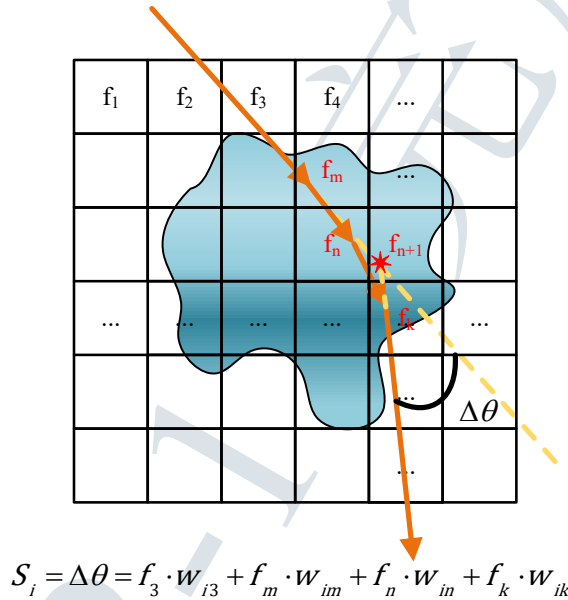


图 5.12 缪子散射成像事例重建示意图

在数据处理中，由于散射为随机过程，很难给出缪子在物质中的径迹。因此，PoCA 算法对该过程进行简化，认为所有的散射都发生在一个像元中，该像元是距离入射径迹和出射径迹最近的点，这也是 PoCA 算法名称的由来。在三维空间中，距离入射径迹和出射径迹最近的点为两直线公垂线段上的点。为了不失对称性，将该点取为公垂线段中点。二维平面中重建点为入射径迹和出射径迹交点。在图 5.12 中，经过 PoCA 重建的点为像元 f_{n+1} 。

由于 PoCA 算法采用了单次散射近似，对于大角度散射事例可能会出现错误的重建点。本研究受到 k 近邻算法 (kNN, k-Nearest Neighbors algorithm)^[10] 处理思路的启发，对 PoCA 算法做了相应的改进，可以使得成像结果更清晰。

对空间中的每个重建点，统计其近邻重建点个数。由于待测物质在空间中分布具有一定连续性，孤立的重建点是源于径迹测量偏差或者重建错误所造成。因此，设置一个合理的阈值，将最近邻点数小于阈值的成像点去除，可以得到更清晰的重建图像。

5.3.2 成像实验

本节针对不同的物体进行成像实验，现阶段使用的探测器有效面积为 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ ，适用于较小尺寸物体成像。使用前文设计的两种编码方案，分别开展相应的成像实验。

1. 旧编码方案用于成像实验

上一节测试结果显示，使用旧编码方案对探测器信号进行编码，会带来位置分辨率变差和效率损失。即使在此条件下，成像平台也能完成相应的成像实验。

图 5.13 所示为对钨材料进行成像的结果，材料最小宽度为 2 cm ，厚度为 4 cm 。由于材料尺寸较小，相应的成像时间较长。成像实验开展 4 小时后，已经能对物体进行较清晰地重建；此时由于散射点数量较少，对于一些偏离成像中心的点，还不能很好地排除。积累 24 小时测试数据后，可以清晰地得到物体在空间中的成像，同时偏离物质的错误重建点也能很好地滤除。测试结果表明，对于 2 cm 尺寸的物体，缪子成像装置可以清晰地重建其边界。

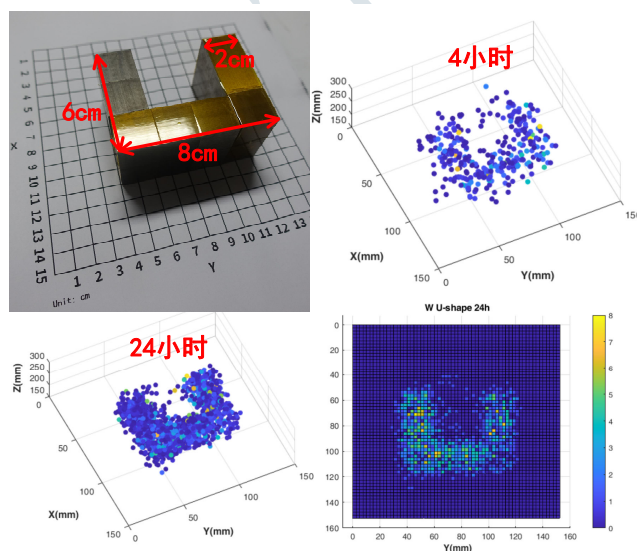


图 5.13 使用旧编码方案对钨材料进行成像结果

图 5.14 所示为 4 个 $6\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 铅块包围 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 钨块的成像结果，钨块和铅块之间的空隙为 2 cm 。使用 4 小时的成像数据，可以区分出钨和铅的分布区域。当成像时间增加至 24 小时，可以成功地重建钨和铅的位置，并且能够区分它们之间的空隙。实验结果表明，在物体间隙为 2 cm 的情况

下，本装置可以将其成功成像。

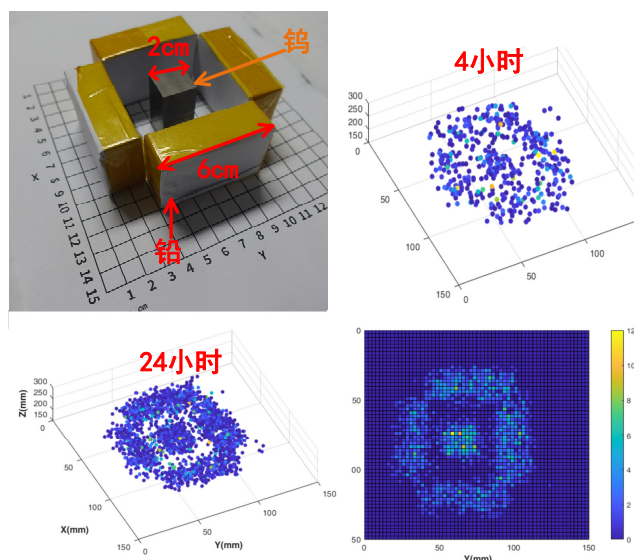


图 5.14 使用旧编方案对钨和铅进行成像

2. 哈密顿回路编码方案用于成像实验

使用哈密顿回路编码方案对探测器信号进行编码读出，探测效率更高。因此在相同时间内，记录的有效径迹数目更多，更有利于算法对结果进行重建。同时该方案得到的位置分辨率更好，可以减少重建错误带来的噪点，使得成像结果更清晰。

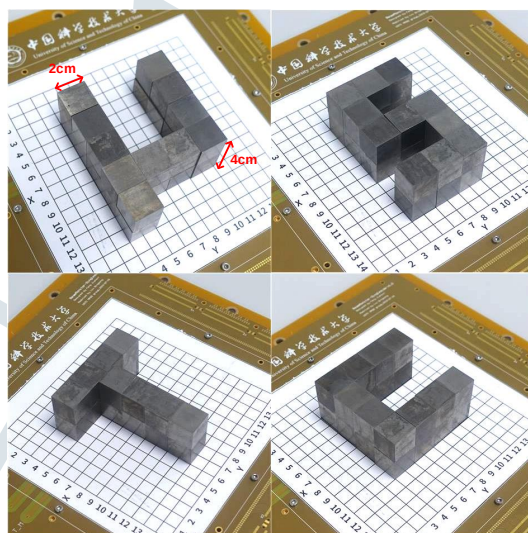


图 5.15 待成像物体形状（材料均为钨）

图 5.15所示为本方案的一组成像实验所用样品，所有样品材料均为钨，最短边长度为 2 cm，垂直方向厚度为 4 cm。图 5.16所示为使用 PoCA 算法对 4 小时成像数据进行处理的结果，可以正确地重建出物质的位置。设置合适的筛选阈值

后，可以将大部分错误的重建点去除。

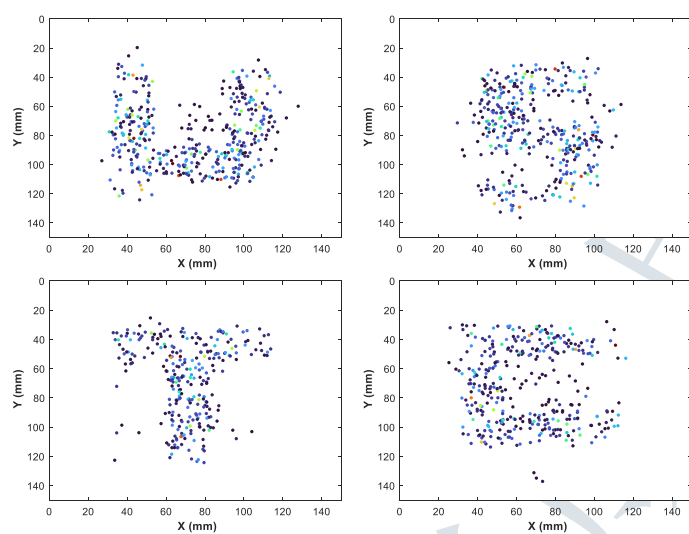


图 5.16 使用哈密顿回路编码方案对 μ , S, T, C 形状铅块成像 4 小时结果

有研究发现，在缪子散射成像装置中，不同位置的缪子通量存在差异。水平方向上，成像区域边缘的缪子通量只有中心通量的 10%~20%^[11]。在实验中，“ μ 形状”样品左下角和“S 形状”的下部有所缺失。这是由于样品靠近成像区边缘，缪子事例数较成像区中部更少，使得成功重建的事例数减少。

当成像时间增加后，有效散射事例数增加，成像质量将大幅度改善。图 5.17 所示为 24 小时成像结果，在对该数据的处理过程中，使用更大的筛选阈值，将图像中的“噪点”进一步去除，同时“ μ 形状”的左下角也被成功重建。说明散射成像实验装置能够成功重建 2 cm 尺寸物体。

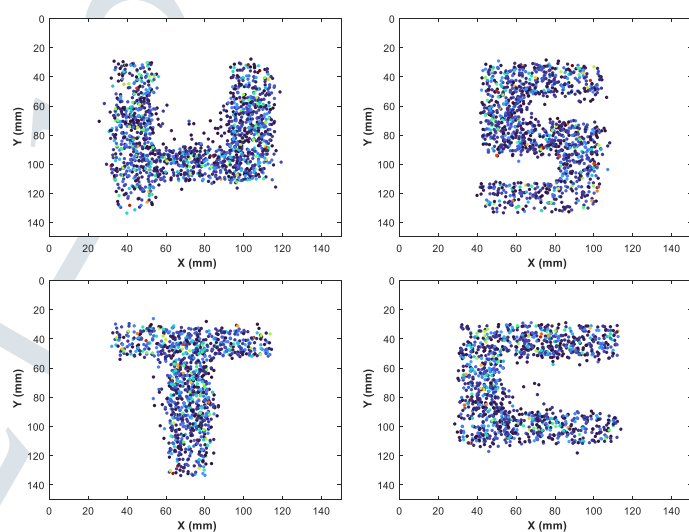


图 5.17 使用哈密顿回路编码方案对 μ , S, T, C 形状铅块成像 24 小时结果

在对散射点进行重建过程中， Z 轴坐标可以表示为 $z = x/\tan \theta$ ，其中 θ 为缪子的散射角。若径迹上有晃动 $\Delta\theta$ ，则重建点 Z 轴晃动为 $\Delta z = (x \cdot \Delta\theta)/\sin^2 \theta$ 。由于大部分缪子的散射角较小，垂直方向的位置晃动较水平方向位置晃动更大。在缪子成像实验中，装置对散射点垂直方向重建准确度更差，在一定程度上造成结果模糊。

为了验证系统在垂直方向的空间成像能力，使用图 5.18 所示形状的样品开展成像实验，其中钨块的边长为 2 cm，中间的空隙大小为 2 cm × 4 cm × 6 cm。

图 5.19 所示为经过 24 小时测试后得到的成像结果，空隙位置被正确重建。中间空隙处有少量的错误重建点，是由于径迹晃动和 PoCA 算法重建造成的。结果表明，对于垂直方向上厘米量级的空隙，本装置能够对其正确重建。若进一步增加成像时间，可以将更多的错误重建点去除。

有仿真研究指出，可以再增加一组水平方向摆放的成像装置，对水平入射的缪子进行测量。利用这些缪子的信息，可以减少垂直方向的错误散射重建点，提高成像精度^[11]。

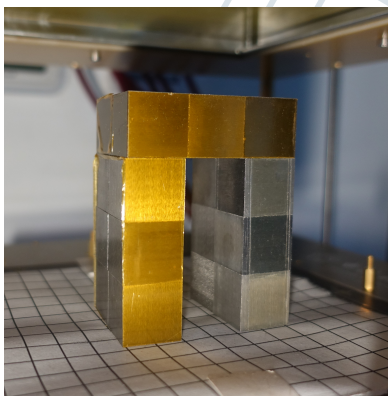


图 5.18 使用钨材料搭建的“n”型样品

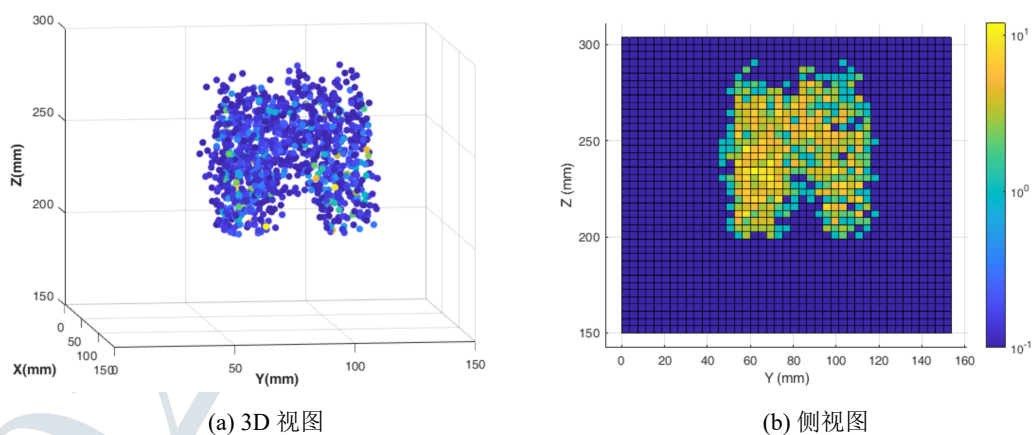


图 5.19 对图 5.18 样品成像散点图和 YZ 平面统计图

除了上述成像结果之外,本套散射成像装置还对其他物体进行了成像实验,样品及成像结果详见附录F。

在成像精度和成像时间方面,本研究搭建的基于 Micromegas 探测器方案的缪子成像装置具有显著的优势。目前国内外已开展的缪子成像实验,其待测物体尺寸为数十个厘米,成像时间为数十个小时至几天^[12-18];本论文搭建的样机可以在4小时内,对厘米量级物体实现成像^①。

5.3.3 物质区分实验

由第二章分析可得,在不同物质中,缪子散射角分布的标准差不同。利用此性质,可以区分不同物质,第二章通过仿真验证了该方法的可行性。为了验证散射成像装置重建不同物质散射角的能力,使用铁、铜、铅、钨四种样品开展实验,并对其散射角进行统计。由于样品数量限制,实验中样品尺寸为 $4\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 12\text{ cm}$ 。使用 PoCA 算法对缪子散射点进行重建,将入射径迹和出射径迹的夹角作为该散射点的散射角;同时,以散射点为原点,入射径迹方向为 Z 轴正方向,建立正交坐标系,将空间散射角投影至两个正交平面,完成对散射角投影值的计算。由于不同缪子的入射方向和散射方向是相互独立的,该坐标系不会对统计结果造成影响。

由第二章对散射角的分析可得,在固定缪子动量条件下,N个缪子归一化散射角在正交平面投影后,其方差之和服从自由度为 $2N$ 的卡方分布。然而,海平面附近缪子能量有一定分布宽度。缪子能量越大,其散射角越小,因此实际测量到的散射角包含了不同能量缪子在物体中的散射角,其分布不能使用高斯分布做估计,也很难得出解析表达式。为了对实验结果进行对比和验证,使用 Geant4 对上述实验过程进行仿真,利用 CRY 软件包产生符合海平面能量分布的缪子。

除了宇宙线缪子能量分布会造成散射角分布变化外,缪子成像装置的径迹重建晃动也会造成缪子散射角分布变宽。由第二章式 (2.5) 可得,径迹重建晃动的方差将线性叠加到重建后散射角的方差中。因此,与实际物体的散射角标准差相比,测量得到的散射角标准差更大。为了使仿真所得散射角和测量所得散射角更接近,在对仿真数据进行重建的过程中,对每个仿真坐标点叠加相应的位置测量晃动,利用叠加了晃动的探测器坐标进行缪子径迹重建。除此之外,散射点和散射角重建过程与实际数据处理过程一致。

图 5.20 所示为四种物质仿真和实测的散射角分布图。根据结果分析,相较于铁和铜,钨和铅的散射角分布更宽,与单能缪子多次库伦散射理论分析趋势一致,下面从数值上进行计算和分析。

^①目前已有团队对本研究所得数据进行分析,采用适当的算法,可以在半小时内实现前文所示 μSTC 样品的成像。

由图 5.20 可得, 铁和铜的散射角分布较为接近, 钨和铅的散射角分布较为接近, 由于缪子的多次库仑散射是个随机过程, 仅仅依靠散射角分布的形状, 无法对上述四种样品进行区分。由第一章式 (1.7) 可得, 缪子散射角分布与缪子的动量、材料的辐射长度以及物体的厚度相关。虽然宇宙线缪子在物质中散射角分布不能用高斯分布来近似, 但是其分布的标准差依旧可以用来表征物质的性质。有仿真结果显示, 对缪子能量做恰当的无偏估计, 使用单能缪子近似仍可实现对未知物质的区分^[7]。

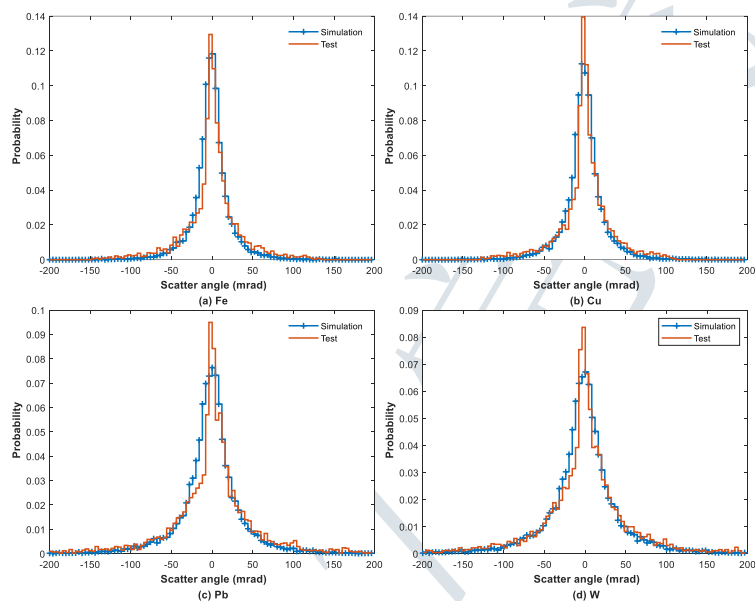


图 5.20 4 cm 厚度的铁、铜、铅、钨材料的缪子散射角投影分布

由于宇宙线缪子能谱较为复杂, 同时成像装置会对散射角分布叠加额外的展宽, 宇宙线缪子在物质中的散射角标准差难以计算出解析表达式。对于一套确定的散射成像装置, 可以采用实验的方法, 统计不同物质散射角标准差的分布。将待测物质散射角标准差与该分布进行对比, 可以在一定置信度下判断物质的种类。从统计角度来说, 缪子散射角测量结果是对缪子在物质中散射角分布总体的一次抽样。测量时间越长, 得到的缪子统计量越多, 则对缪子散射角标准差的估计越准确。

设在实验中测到 N 个缪子, 对第二章式 (2.3) 进行变形, 可得式 (5.1)。其中 $\sigma(\hat{\theta})$ 为 N 个事例得到的缪子散射角标准差估计值; X 定义如式 (2.1) 所示, X 服从自由度为 $2N$ 的卡方分布; $\sigma(\theta)$ 为物质对缪子散射角标准差理论值, 是一个与测试无关的量。在测试中, 若 N 越大, 则 $\sigma(\hat{\theta})$ 对 $\sigma(\theta)$ 的估计越准。当 N 足够大时, $\sigma(\hat{\theta})$ 可以表征物质对缪子的散射角标准差。通过测试, 计算得四种物质对缪子散射角的标准差分别为: $\sigma_{Fe} = 36.7 \text{ mrad}$, $\sigma_{Cu} = 39.5 \text{ mrad}$, $\sigma_{Pb} = 52.0 \text{ mrad}$, $\sigma_W = 58.6 \text{ mrad}$ 。

$$\sigma(\hat{\theta}) = \sqrt{\frac{X \cdot \sigma(\theta_0)}{2N}} \quad (5.1)$$

上述测试分别得到了四种物质的散射角标准差测量值，为了验证系统对水平摆放物体的区分能力，同时对尺寸为 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 的铁、铜、铅和钨进行 24 小时测试，样品摆放位置和成像结果如图 5.21 所示，在成像结果中能够正确区分出不同物质的边界。其中钨和铅由于散射角较大，PoCA 算法会将少量大角度散射事例重建到物质之外，使得物质边界有部分模糊。在数据处理过程中，由于对散射角设置了筛选条件，去掉了较小散射角对应的重建结果。因此有如下事例数关系： $N_W > N_{Pb} > N_{Cu} > N_{Fe}$ ，从事例数角度可以定性地区分不同物质。

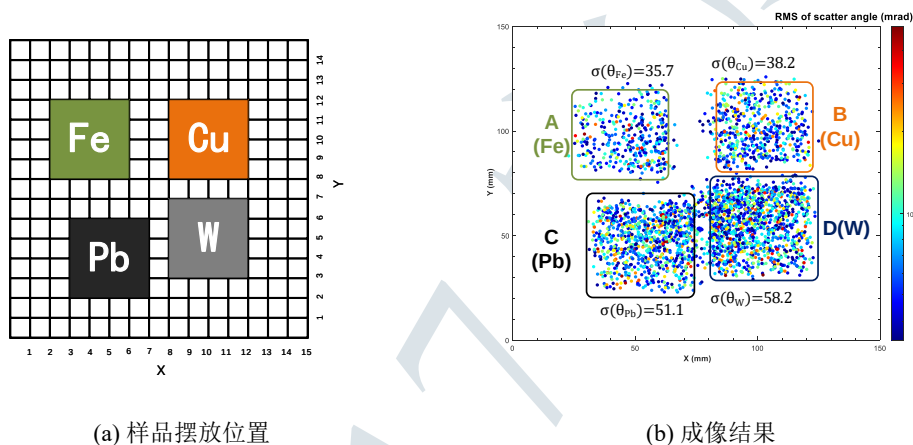


图 5.21 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 的铁、铜、铅和钨样品摆放位置及成像结果

根据成像结果，对不同区域内物质的散射角标准差进行计算，并利用卡方分布计算其 95% 置信度分布区间，结果如表 5.2 所示。其中钨和铅的分布区间存在少量重叠，通过卡方分布计算，在该区间内将钨误判为铅的比例为 2%，故在此条件下可以将它们进行区分；铁和铜的计算结果存在较多重叠区间，因此无法将他们区分开。缪子成像主要应用于区分由重核物质构成的特殊材料，区分铁和铜并非其重点。

表 5.2 对图 5.21 中 4 个区域的散射角统计结果

区域	散射角标准差 (mrad)	事例数	95% 置信区间 (mrad)
A(铁)	35.7	740	[33.05, 40.53]
B(铜)	38.2	819	[35.77, 43.41]
C(铅)	51.1	1152	[47.02, 55.36]
D(钨)	58.2	1753	[54.78, 62.54]

5.4 透射成像实验

本节将基于5.1.2搭建的透射成像装置，开展相应的透射成像实验。本小节将从透射成像原理出发，开展缪子透射成像实验，验证读出电子学满足实验需求。

5.4.1 透射成像算法分析

透射成像的基本原理是测量物体对缪子的吸收能力，不同厚度和不同材料的物质对缪子吸收能力不同。在理想条件下，若能同时测量穿过物体前和穿过物体后的缪子通量，可以实现对物体的精确成像。在当前实验技术发展条件下，无法提供能大面积覆盖建筑物或山体的探测器。在同一地点，相同探测器倾角条件下，缪子通量可以近似认为是稳定的。因此，使用宇宙线缪子本底通量测量代替缪子入射通量测量。在实验中，先将成像装置对准待测物体，测量缪子经过物体后的通量 $I_T(\theta, \varphi)$ ；然后以相同的探测器倾角，将成像装置对准没有物体的天空，测量该角度缪子的通量 $I_F(\theta, \varphi)$ 。由于缪子通量在同一个天顶角条件下各向同性，待测物体对缪子的吸收比例为 $t(\theta, \varphi) = \frac{I_F(\theta, \varphi) - I_T(\theta, \varphi)}{I_F(\theta, \varphi)}$ 。

如图 5.22 所示，在透射成像实验中，探测器平面法线方向和垂直方向成一定的夹角。因此对径迹进行重建时，先对探测器击中位置进行旋转，利用旋转后的击中位置坐标进行径迹重建，在球坐标下对径迹的 θ 角和 φ 角进行统计，即可得到 $I(\theta, \varphi)$ 。

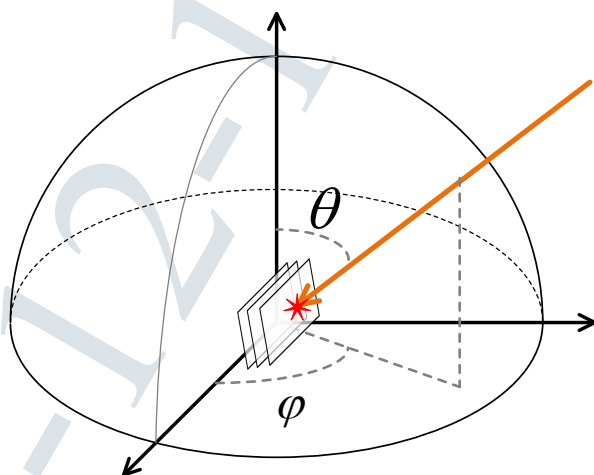
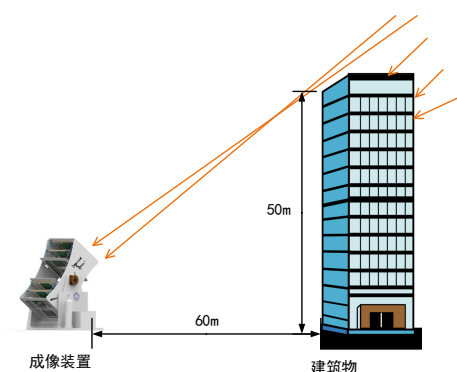


图 5.22 散射成像径迹重建示意图

5.4.2 成像实验

本研究利用前文搭建的透射成像装置，对中国科学技术大学教学科研楼（地空楼）开展了成像实验。图 5.23 所示为散射成像装置与建筑物关系示意图，成像

装置距离待测大楼约 60 米，倾角 38 度，楼高约为 50 m（16 层）。



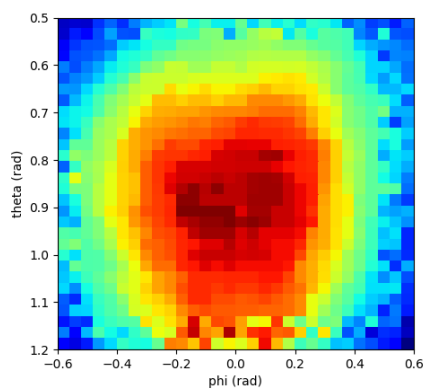
(a) 成像实验位置示意图



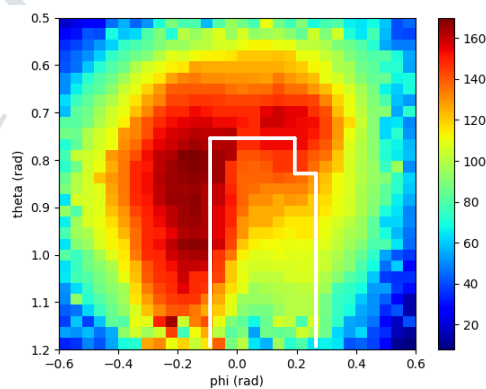
(b) 成像实验现场

图 5.23 透射成像实验现场及位置示意

测试结果如图 5.24 所示，成像时间为一周。图 5.24(a) 为没有建筑物条件下测量到的缪子通量分布，图 5.24(b) 为对准建筑物所测的缪子通量分布，图 5.24(b) 中右下方有明显通量减少区域，是由于建筑物吸收了部分缪子所致。在数据处理中，对缪子天顶角分布进行了归一化处理，同时使用中值滤波算法^[19] 减少图像中噪点。



(a) 没有建筑物缪子通量



(b) 有建筑物缪子通量

图 5.24 有、无建筑物条件下测得缪子通量分布

图 5.25(a) 为待测建筑物照片，图 5.25(b) 为无建筑物时缪子通量减去有建筑物时缪子通量所得结果，从图中可以清晰的将天空与建筑物区分开。

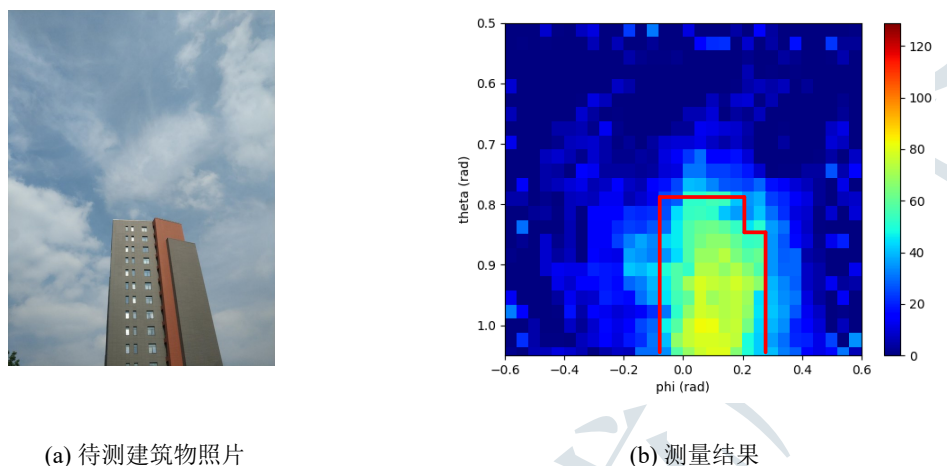


图 5.25 建筑物照片及缪子成像结果对比

5.5 本章小结

本章完成了散射和透射两种成像装置样机的搭建，并对系统性能展开了相应的测试。针对第三章设计的两种编码读出板和第四章设计的读出电子学，对其性能进行测试。实验结果表明，本研究设计的读出电子学能满足宇宙线成像的读出需求。其中，使用基于哈密顿回路的编码读出方案对探测器进行读出时，在额外带来的噪声增加的情况下，仍能满足前端电子学读出需求；同时使用该方案，径迹系统达到的位置分辨率和效率，能满足宇宙线缪子成像实验需求。

完成性能测试后，本章开展了散射成像实验和透射成像实验。散射成像实验结果表明，本套装置可以完成厘米量级的物质成像，同时可以对 4 cm 厚的铅、钨、铁或铜进行物质区分；透射成像实验结果表明，本套装置可以完成建筑物成像，并成功区分不同区域。上述实验表明，本研究所设计的编码读出方案和读出电子学方案，能很好地实现宇宙线缪子成像读出。

参考文献

- [1] BRUN R, RADEMAKERS F, CANAL P, et al. root-project/root: v6.18/02[CP/OL]. Zenodo (2019-08-23)[2021-03-26]. <https://zenodo.org/record/3895860#.YF1Pcz8RWUk>. DOI: 10.5281/zenodo.3895860.
- [2] RUDER S. An overview of gradient descent optimization algorithms[J/OL]. arXiv:1609.04747 [cs][2020-12-14]. <http://arxiv.org/abs/1609.04747>.
- [3] HOCHREITER S, YOUNGER A S, CONWELL P R. Learning to learn using gradient descent [C/OL]//DORFFNER G, BISCHOF H, HORNIK K. Lecture Notes in Computer Science: Artificial Neural Networks —ICANN 2001. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001: 87-94. DOI:

- 10.1007/3-540-44668-0_13.
- [4] ANDRYCHOWICZ M, DENIL M, GOMEZ S, et al. Learning to learn by gradient descent by gradient descent[J/OL]. arXiv:1606.04474 [cs][2021-03-27]. <http://arxiv.org/abs/1606.04474>.
- [5] IODICE M. Performance studies of MicroMegas for the ATLAS experiment[J/OL]. Journal of Instrumentation, 9(1): C01017-C01017[2020-07-15]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/9/01/C01017>.
- [6] ALEXOPOULOS T, BIANCO M, BIGLIETTI M, et al. Performance studies of resistive-strip bulk micromegas detectors in view of the ATLAS new small wheel upgrade[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 937: 125-140[2019-11-30]. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900219305194>. DOI: 10.1016/j.nima.2019.04.050.
- [7] SCHULTZ L J. COSMIC RAY MUON RADIOGRAPHY[Z]. Portland, Oregon, United States: Portland State University, 2003.
- [8] SCHULTZ L J, BLANPIED G S, BOROZDIN K N, et al. Statistical reconstruction for cosmic ray muon tomography[J/OL]. IEEE Transactions on Image Processing, 16(8): 1985-1993. DOI: 10.1109/TIP.2007.901239.
- [9] CHATZIDAKIS S, LIU Z, JARRELL J J, et al. Maximum-a-posteriori cosmic ray muon trajectory estimation with energy loss for muon tomography applications[C/OL]//2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). 2017: 1-2. DOI: 10.1109/NSSMIC.2017.8532838.
- [10] ALTMAN N S. An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression[J/OL]. The American Statistician, 46(3): 175-185[2021-03-30]. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00031305.1992.10475879>.
- [11] HOHLMANN M, FORD P, GNANVO K, et al. GEANT4 simulation of a cosmic ray muon tomography system with micro-pattern gas detectors for the detection of high-z materials[J/OL]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 56(3): 1356-1363. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5076040>. DOI: 10.1109/TNS.2009.2016197.
- [12] BOROZDIN K N, HOGAN G E, MORRIS C, et al. Radiographic imaging with cosmic-ray muons[J/OL]. Nature, 422(6929): 277-277[2019-08-09]. <http://www.nature.com/articles/422277a>. DOI: 10.1038/422277a.
- [13] PESENTE S, VANINI S, BENETTONI M, et al. First results on material identification and imaging with a large-volume muon tomography prototype[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 604(3): 738-746[2020-01-02]. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900209004380>. DOI: 10.1016/j.nima.2009.03.017.

- [14] ANGHEL V, ARMITAGE J, BOTTE J, et al. Construction, commissioning and first data from the CRIPT muon tomography project[C/OL]//2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC). 2012: 738-742. DOI: 10.1109/NSSMIC.2012.6551201.
- [15] ANGHEL V, ARMITAGE J, BOTTE J, et al. Prototype testing and algorithm development for the cosmic ray inspection and passive tomography (CRIPT) project[C/OL]//2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2011: 959-963. DOI: 10.1109/NSSMIC.2011.6154302.
- [16] BAESSO P, CUSSANS D, THOMAY C, et al. Toward a RPC-based muon tomography system for cargo containers.[J/OL]. Journal of Instrumentation, 9(10): C10041-C10041[2020-01-08]. <http://stacks.iop.org/1748-0221/9/i=10/a=C10041?key=crossref.e66410fc1ad03c97d151cf26d1c7ecea>. DOI: 10.1088/1748-0221/9/10/C10041.
- [17] WANG X, ZENG M, ZENG Z, et al. The cosmic ray muon tomography facility based on large scale MRPC detectors[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 784: 390-393 [2021-04-27]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215000510>. DOI: 10.1016/j.nima.2015.01.024.
- [18] GNANVO K, GRASSO L V, HOHLMANN M, et al. Imaging of high-z material for nuclear contraband detection with a minimal prototype of a muon tomography station based on GEM detectors[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 652(1): 16-20 [2020-01-08]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900211002658>. DOI: 10.1016/j.nima.2011.01.163.
- [19] BROWNRIGG D R K. The weighted median filter[J/OL]. Communications of the ACM, 27 (8): 807-818[2021-05-20]. <https://doi.org/10.1145/358198.358222>.

2021-12-17 完成版本

第6章 总结与展望

6.1 总结

经过几十年的发展，宇宙线缪子成像技术已经在山体成像、建筑物探测、重核物质成像等领域展示出巨大的应用潜力。随着火山监控、考古探测和特殊核材料检测需求的不断提升，缪子成像装置的指标要求也随之提高，目前已有的缪子成像系统尚不能满足实际需求。在兼顾大面积和高位置分辨率的技术要求下，本文开展了针对 Micromegas 探测器的高位置分辨缪子成像系统读出电子学研究。

目前，国际上开展的大多数宇宙线成像研究，没有设计专用于实验的读出电子学系统，而是直接采用为其他粒子物理实验设计的探测器和读出电子学。如前文所述，缪子成像的基本物理过程较为明确，理论上使用任何探测器都能实现缪子成像。然而，若不对读出电子学和探测器进行针对性设计和优化，系统的成像质量将很难得到提升，成像时间也较长。

本文从宇宙线成像的原理入手，通过仿真分析得到缪子成像所需的面积与位置分辨率指标。在理想条件下若要在 10 分钟内对数千千克重核物质进行成像，成像系统需要百微米量级的位置分辨率和平方米量级的面积；若要在 2 分钟内，实现对 4 千克的铅和铀的区分，成像系统的位置分辨率需要好于 1 mm，满足成像实验需求的系统也能满足物质区分需求。对于透射成像，若要在数小时内完成建筑物成像，则成像系统面积需大于 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。

针对缪子成像海量读出通道数和宇宙线缪子击中稀疏的特点，本文首先开展了编码读出方案研究，在作者所属实验室之前的研究基础上，提出了一套新的编码读出方案。在该方案中，当 n 为奇数时，利用 n 个电子学通道可以实现 $\left(\frac{n \times (n-1)}{2} + 1\right)$ 个探测器通道读出；当 n 为偶数时，可以实现 $\left(\frac{n \times (n-1)}{2} - \frac{n-2}{2} + 1\right)$ 个探测器通道读出。同时在任意 $n-5$ 个连续探测器通道范围内，读出电子学通道和探测器通道一一对应。因此，在针对宇宙线成像的读出中，该方案达到的读出效果与直接读出几乎一致。

根据探测器信号特点和对噪声的需求，前端读出电子学采用法国原子能署 Saclay 研究所，为气体探测器读出研发的专用读出芯片 STAGE 和 AGET。该芯片可以在不同采样率下对信号波形进行采样，可以据此重建探测器信号的电荷量和时间。后端电子学采用可扩展的读出系统架构，针对不同的前端电子学数量，可以灵活地配置不同的工作模式；同时针对不同的应用场合，可以选择不同的数据传输接口和控制设备。

基于前文研究的读出电子学，本研究搭建了散射成像和透射成像两套实验样机，并对系统性能进行测试。根据测试结果，前文设计的读出电子学和编码读

出方案能满足宇宙线缪子成像需求。基于散射成像实验样机,本文开展了物质成像和物质区分实验。实验结果表明,在物质成像方面,成像系统可以在数小时内完成 2 cm 尺寸物质的成像;在物质区分方面,成像系统可以实现对钨、铅、铁或铜的区分。基于透射成像实验样机,本文开展了对中国科学技术大学地空楼的成像实验,结果表明,该装置能够在数天内实现建筑物成像。

综上,论文的创新点如下:

1. 国内首次针对高分辨率 Micromegas 探测器开展缪子成像读出电子研究,实现了满足不同体量和不同成像方式的可扩展读出电子学系统设计。
2. 针对宇宙线缪子事例和 Micromegas 探测器信号特点,对编码读出方案进行研究,实现了基于哈密顿回路的编码方案,其效果与直接读出一致;并在不混叠探测器信号的前提下,实现了最大通道压缩率。

6.2 展望

目前,读出电子学和成像系统工作正常,验证了系统能够实现宇宙线缪子成像这一研究目标。在接下来的工作中,本文认为可以从以下方向,开展进一步研究:

1. 对编码方案和数据压缩进行优化,进一步降低系统复杂度和数据量。寻找新的数学模型对编码方案进一步优化,以降低探测器打火或通道无响应等情况对编码的影响。从信息学角度入手,对缪子成像所需信息量进行分析,降低读出数据量,以实现更轻量化系统架构。
2. 开展山体和古建筑成像和大面积探测器成像实验,展示缪子成像的广阔应用前景。开展大面积探测器读出验证工作,使得缪子成像系统实用化。针对我国众多古代遗迹以及山体进行成像,进一步扩大缪子成像的应用范围。
3. 面对规划中的高能人造缪子源,开展相应研究,扩展缪子成像的应用范围。对成像系统加以改造,以适应高能人造缪子源成像需求。针对高能缪子源特点,研究新的缪子成像方式(如断层扫描成像等)。

附录 A 编码表生成算法

算法 A.1 哈密顿路径编码表生成算法

Data: 电子学通道数 n

Result: 编码表序列数组

- 1 初始化二维数组 all_vertices ;
 - 2 按顺序构造 $H_{k(n)}$, ($k = 0, 1, 2, \dots, (n-3)/2$);
 - 3 **if** n 为奇数 **then**
 - 4 按3.3.2列举的公式计算 $H_{k(n)}$;
 - 5 **else**
 - 6 先计算 $H_{k(n-1)}$, 然后在数组的前一半序列和后一半序列之间插入 $n-1$;
 - 7 **end**
 - 8 将上述的 H_k 存储在二维数组 all_vertices 中;
 - 9 将数组 $\{0, 1, 2, \dots, (n-3)/2\}$ 分成偶数在前奇数在后的方式排列, 得到数组 hamilton_idx ;
 - 10 将 hamilton_idx 的每个元素作为 all_vertices 的第二个维度的索引, 将 all_vertices 写入新数组 euler_path ;
 - 11 返回 euler_path
-

2021-12-17 完成版本

附录 B “生产者-消费者”模式上位机设计

“生产者-消费者”模式（producer-consumer）是区别于单线程数据存储模式提出的一套数据交互模式^[1-2]。在单线程的数据获取方案中，数据获取的流程为：取数、写硬盘、取数、写硬盘…，由于目前硬盘技术限制，写硬盘的速度很慢，数据存储系统的大量时间消耗在了写硬盘上。针对 USB 数据传输来说，若数据获取不及时，FPGA 的缓存空间会被写满，造成数据丢失。针对这个问题，本文将程序设计中的“生产者-消费者”模型加入到上位机设计中。

如图附录B.1所示，在该模型中，设置一个合适大小的缓冲区，使用多线程的生产者从 USB 中取数，如图中的线程数为 N，按照顺序向缓冲区写入数据。由于写文件句柄不能同时操作，因此使用单个消费者从缓冲区中取数并写文件。在这样的模式中可以保证不会由于硬盘写入阻塞造成数据丢失的情况，其极限传输速度为硬盘最大写入速度。

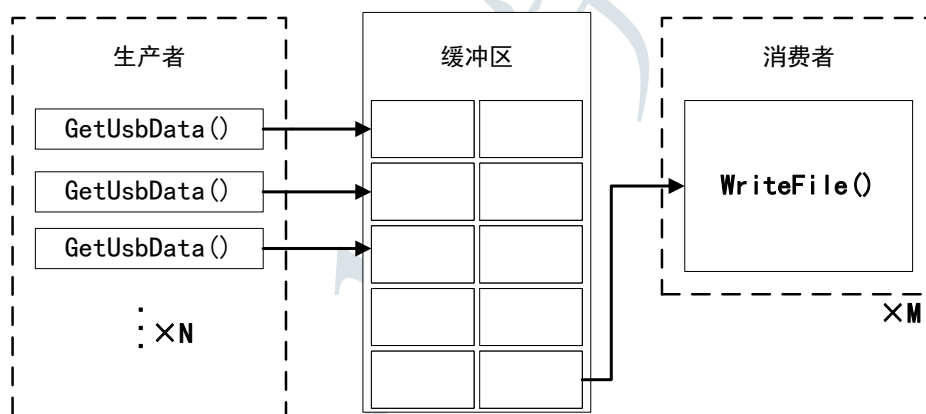


图 B.1 “生产者-消费者”模型示意图

参考文献

- [1] DIJKSTRA E W. Information streams sharing a finite buffer[J/OL]. Information Processing Letters, 1(5): 179-180[2021-03-25]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0020019072900348>. DOI: 10.1016/0020-0190(72)90034-8.
- [2] Dijkstra, E. W. Cooperating sequential processes[M/OL]. unpublished manuscript, [2021][2021-03-25]. <https://www.cs.utexas.edu/users/EWD/ewd01xx/EWD123.PDF>.

2021-12-17 完成版本

附录 C 探测器本征位置分辨率计算

由第五章计算可得，径迹系统的位置分辨率计算为 $\sigma^2(\Delta x_i) = \sigma^2(x_{i,fit}) + \sigma^2(x_{i,hit})$ ，其中 $\sigma(x_{i,fit})$ 为拟合位置的晃动，要根据其他探测器的位置分辨进行计算， $\sigma(x_{i,hit})$ 即为该层探测器对应的位置分辨率。

在进行径迹拟合时，为了避免直线斜率为无穷大，使用 z 轴坐标作为自变量， x 坐标作为因变量进行拟合，即 $x_{i,fit} = k_i \cdot z_i + b_i$ 。利用最小二乘法可得 $k_i = \frac{\sum_{j \neq i}^n (z_j - \bar{z}) x_{j,hit}}{\sum_{j \neq i}^n (z_j - \bar{z})^2}$ ， $b_i = \bar{x} - k_i \cdot \bar{z}$ ，注意式中的 $\bar{x}$ 和 $\bar{z}$ 均不包含第 i 层的坐标。实验中，将 z 轴方向坐标视为常量，令 $a_j = \frac{z_j - \bar{z}}{\sum_{j \neq i}^n (z_j - \bar{z})^2}$ ，经过一些变换可得 $\sigma^2(x_{i,fit})$ 的计算如式 (C.1) 所示，其中 n 为探测器总层数。

$$\sigma^2(x_{i,fit}) = \sum_{j \neq i}^n \left((z_i - \bar{z}) \cdot a_j + \frac{1}{n-1} \right)^2 \cdot \sigma^2(x_{j,hit}) \quad (C.1)$$

此时易得方程 $\sigma^2(\Delta x_i) = \sigma^2(x_{i,fit}) + \sigma^2(x_{i,hit}) = \sum_{j=1}^n B_{ij} * \sigma^2(x_{i,hit})$ ，其中 B_{ij} 如式 (C.2) 所示。 n 个方程， n 个未知数，解方程即可得到 $\sigma^2(x_{i,fit})$ 。

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, i = j \\ \left[(z_i - \bar{z}) a_{ij} + \frac{1}{n-1} \right]^2, i \neq j \end{cases} \quad (C.2)$$

2021-12-17 完成版本

附录 D 基于梯度下降法对位置进行修正

使用该方法的一个基本思想是当探测器位置已经被修正后，击中位置和拟合击中位置之差应当为 0。在真实数据处理过程中，由于击中位置记录有一定的晃动，因此该差值不可能达到 0。在击中事例足够多的条件下，可以将击中位置和拟合击中位置之差降到最小。因此，利用统计中的梯度下降法对该差值进行处理。

梯度下降法的基本思想是沿着可导函数的梯度减小方向求得该函数的最小值^[1-4]。对于有 N 个参数的处处可导函数 $L(\theta_1, \dots, \theta_n)$ ，以其中一个参数为例，设定其初始值为 θ_{i0} ，令迭代公式为 $\theta_i(n+1) = \theta_i(n) - \eta \times \frac{\partial L}{\partial \theta_i}$ ，其中 η 称为迭代率，也就是每迭代一步， θ_{i0} 的值都向使得 L 变小的方向“移动”，经过足够的迭代次数之后， L 取得极小值。

位置修正中损失函数定义如式 (D.1) 所示，在计算中将差值平方后相加，使得损失函数可微，同时避免正负偏差相抵效。其中第一个求和符号表示对所有的宇宙线事例进行求和，第二个求和符号表示对每一层探测器的偏差进行求和。在测试中，使用了 8 层探测器，下面的推导过程均为 8 层探测器的计算结果。

$$L = \sum_{\text{event}=1}^M \left[\sum_{i=0}^7 (\delta_{x,i}^2 + \delta_{y,i}^2) \right] \quad (\text{D.1})$$

其中

$$\delta_{x,i}^2 = (x_i - k_{x,i} * z_i - b_{x,i})^2 \quad (\text{D.2})$$

$$\delta_{y,i}^2 = (y_i - k_{y,i} * z_i - b_{y,i})^2 \quad (\text{D.3})$$

其中

$$k_{x,i} = \frac{\sum_{m \neq i} (z_m - \bar{z}) x_m}{\sum_{m \neq i} (z_m - \bar{z})^2} \quad (\text{D.4})$$

$$b_{x,i} = \bar{X} - k_{x,i} \times \bar{Z} \quad (\text{D.5})$$

式 (D.2) 和 (D.3) 中的 $\delta_{x,i}^2$ 和 $\delta_{y,i}^2$ 的含义是：对于第 i 层来说，用其他层进行拟合之后得到一条直线，然后计算第 i 层击中位置和这层位置的偏差。

进一步地，可以将式 (D.4) 简化为式 (D.6)，注意等式右边的均值计算是不包括第 i 项的。

$$k_{x,i} = \frac{\overline{xz} - \bar{x} \cdot \bar{z}}{z^2 - (\bar{z})^2} \quad (D.6)$$

设待求的位置偏差为 $[\Delta x_0, \Delta x_1, \dots, \Delta x_7, \Delta y_0, \Delta y_1, \dots, \Delta y_7, \Delta z_0, \Delta z_1, \dots, \Delta z_7] = [\theta_0, \dots, \theta_{23}]$ ，则探测器修正方程如式 (D.7) 所示，其中 x'_i, y'_i, z'_i 为测量得到的坐标值。

$$\begin{cases} x_i = x'_i + \Delta x_i \\ y_i = y'_i + \Delta y_i \\ z_i = z'_i + \Delta z_i \end{cases} \quad (D.7)$$

经过简单计算有如下结果：

$$\frac{\partial k_{x,i}}{\partial x_i} = 0, \frac{\partial b_{x,i}}{\partial x_i} = 0 \quad (D.8)$$

$$\frac{\partial k_{x,i}}{\partial x_j} = \frac{1}{N} \cdot \frac{z_j - \bar{z}}{z^2 - (\bar{z})^2} (j \neq i) \quad (D.9)$$

$$\frac{\partial k_{x,i}}{\partial z_j} = \frac{1}{N} \cdot \frac{x_j - \bar{x}}{z^2 - (\bar{z})^2} - \frac{2k_{x,i}}{N} \cdot \frac{z_j - \bar{z}}{z^2 - (\bar{z})^2} (j \neq i) \quad (D.10)$$

$$\frac{\partial b_{x,i}}{\partial x_j} = \frac{1}{N} - \bar{z} \cdot \frac{\partial k_{x,i}}{\partial x_j} \quad (D.11)$$

$$\frac{\partial b_{x,i}}{\partial z_j} = -\bar{z} \cdot \frac{\partial k_{x,i}}{\partial x_j} - \frac{1}{N} \cdot k_{x,i} \quad (D.12)$$

易得：

$$\frac{\partial k_{x,i}}{\partial \Delta \theta_j} = \frac{\partial k_{x,i}}{\partial \theta_j}, \frac{\partial b_{x,i}}{\partial \Delta \theta_j} = \frac{\partial b_{x,i}}{\partial \theta_j} \quad (D.13)$$

也就是在求偏导的时候， θ_i 和 $\Delta \theta_i$ 是等价的

再来看 $\delta_{x,i}^2$ 和 $\delta_{y,i}^2$ 两项

$$\frac{\partial \delta_{x,i}}{\partial \Delta x_i} = 1, \frac{\partial \delta_{x,i}}{\partial \Delta z_i} = -k_{x,i} \quad (D.14)$$

$$\frac{\partial \delta_{x,i}}{\partial \Delta \theta_j} = -Z_i \cdot \frac{\partial k_{x,i}}{\partial \Delta \theta_j} - \frac{\partial b_{x,i}}{\partial \Delta \theta_j} (j \neq i) \quad (D.15)$$

最终的目标是求出 $\partial L / \partial \Delta \theta_i$ 的值，也就是求出下面的表达式

$$\frac{\partial L}{\partial \Delta \theta_i} = \sum_{\text{event}=1}^M \left\{ \sum_{i=0}^7 \left[2\delta_{x,i} \cdot \frac{\partial \delta_{x,i}}{\partial \Delta \theta_i} + 2\delta_{y,i} \cdot \frac{\partial \delta_{y,i}}{\partial \Delta \theta_i} \right] \right\} \quad (D.16)$$

至此梯度下降法需要的梯度值已经全部求出。

参考文献

- [1] HOCHREITER S, YOUNGER A S, CONWELL P R. Learning to learn using gradient descent [C/OL]//DORFFNER G, BISCHOF H, HORNIK K. Lecture Notes in Computer Science: Artificial Neural Networks —ICANN 2001. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001: 87-94. DOI: 10.1007/3-540-44668-0_13.
- [2] ANDRYCHOWICZ M, DENIL M, GOMEZ S, et al. Learning to learn by gradient descent by gradient descent[J/OL]. arXiv:1606.04474 [cs][2021-03-27]. <http://arxiv.org/abs/1606.04474>.
- [3] RUDER S. An overview of gradient descent optimization algorithms[J/OL]. arXiv:1609.04747 [cs][2020-12-14]. <http://arxiv.org/abs/1609.04747>.
- [4] wyu0725. 梯度下降法[EB/OL]. [2021-03-27]. https://www.yuque.com/wyu0725/my_lab_skill/gradient_descent.

2021-12-17 完成版本

附录 E PoCA 算法处理过程

PoCA (Point of Closest Approach) 是宇宙线成像的入门级应用, 原理也很简单, 将多次库伦散射近似为在空间的一个点发生散射, 这个散射点认为是距离出射直线和入射直线最近的点。

设最近邻点为 M , 入射直线为: $l_1 := t \cdot \vec{u} + P$, 散射直线为 $l_2 := s \cdot \vec{v} + Q$, 其中 $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$, $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$ 分别为入射直线和出射直线的方向向量, $P := (P_1, P_2, P_3)$, $Q = (Q_1, Q_2, Q_3)$ 分别为入射直线和出射直线上的点。

在计算中, 首先判断 l_1 与 l_2 是否平行。若直线平行, 理论上最近邻点有无数个, 此时认为缪子没有发生散射, 将该组事例舍去。在 l_1 与 l_2 不平行条件下, 求两直线公垂线段重点。设公垂线段与 l_1, l_2 交点分别为 $P' (P'_1, P'_2, P'_3)$ 和 $Q' (Q'_1, Q'_2, Q'_3)$, 下面通过两种方法求解公垂线段中点。

线性方程法

目前常用的数据分析软件 MATLAB 具有强大的矩阵运算功能, 在使用 MATLAB 进行数据处理时, 使用节线性方程法可以加快数据处理速度。求解方法如下:

易有 $\overrightarrow{PP'} \parallel \vec{u}$ 和 $\overrightarrow{QQ'} \parallel \vec{v}$, 可得四个方程 (在这里为了表示方便使用分数形式, 实际运算中应当使用乘积形式, 避免方向向量某一分量为 0 的情况):

$$\frac{P'_1 - P_1}{u_1} = \frac{P'_2 - P_2}{u_2} = \frac{P'_3 - P_3}{u_3} \quad (E.1)$$

$$\frac{Q'_1 - Q_1}{v_1} = \frac{Q'_2 - Q_2}{v_2} = \frac{Q'_3 - Q_3}{v_3} \quad (E.2)$$

由 $\overrightarrow{Q'P'} \perp \vec{u}$ 和 $\overrightarrow{Q'P'} \perp \vec{v}$, 可得下述两个方程:

$$(P'_1 - Q'_1) \cdot u_1 + (P'_2 - Q'_2) \cdot u_2 + (P'_3 - Q'_3) \cdot u_3 = 0 \quad (E.3)$$

$$(P'_1 - Q'_1) \cdot v_1 + (P'_2 - Q'_2) \cdot v_2 + (P'_3 - Q'_3) \cdot v_3 = 0 \quad (E.4)$$

在 l_1 不平行于 l_2 时, 上述 6 个方程有唯一解, 从线性方程中解得 $P' (P'_1, P'_2, P'_3)$ 和 $Q' (Q'_1, Q'_2, Q'_3)$ 后, 可得其中点坐标 $M = (P' + Q')/2$ 。

向量算法

在实时数据处理中，使用 C++ 和 ROOT 对数据进行处理，解方程效率不高，因此使用下面推导的向量算法对公垂线中点进行计算，可以加快数据处理速度。

设入射直线和出射直线方向向量为 $\vec{u}, \vec{v}$ ，入射直线和出射直线上任意一点分别为 P, Q 。设公垂线段为 $P'Q'$ ，且 $P' = P + t \cdot \vec{u}, Q' = Q + s \cdot \vec{v}$ ，求解的过程变为求 t 和 s 的数值。

设 $\vec{w} = \overrightarrow{QP} = (P_1 - Q_1, P_2 - Q_2, P_3 - Q_3)$

那么 $\overrightarrow{Q'P'} = \overrightarrow{Q'Q} + \overrightarrow{QP} + \overrightarrow{PP'} = -s\vec{v} + \vec{w} + t\vec{u}$

由 $\overrightarrow{Q'P'} \perp \vec{u}$ 和 $\overrightarrow{Q'P'} \perp \vec{v}$ 可得

$$\begin{cases} (-s\vec{v} + \vec{w} + t\vec{u}) \cdot \vec{u} = 0 \\ (-s\vec{v} + \vec{w} + t\vec{u}) \cdot \vec{v} = 0 \end{cases} \quad (\text{E.5})$$

解出向量方程可得

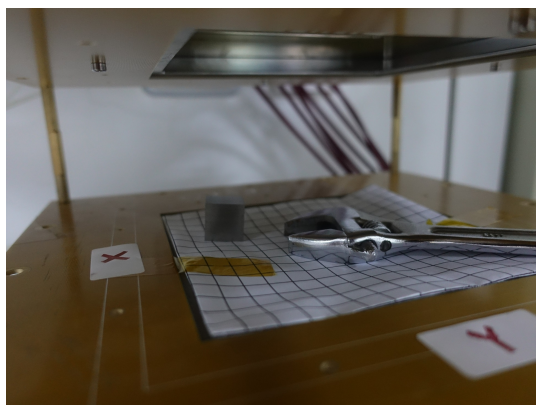
$$\begin{cases} s = \frac{(\vec{u})^2(\vec{w} \cdot \vec{v}) - (\vec{w} \cdot \vec{u})(\vec{u} \cdot \vec{v})}{\vec{u}^2 \vec{v}^2 - (\vec{u} \cdot \vec{v})^2} \\ t = \frac{-(\vec{v})^2(\vec{w} \cdot \vec{u}) + (\vec{w} \cdot \vec{v})(\vec{u} \cdot \vec{v})}{\vec{u}^2 \vec{v}^2 - (\vec{u} \cdot \vec{v})^2} \end{cases} \quad (\text{E.6})$$

易有 $M = \frac{P' + Q'}{2} = \frac{1}{2}(P + t \cdot \vec{u} + s \cdot \vec{v})$

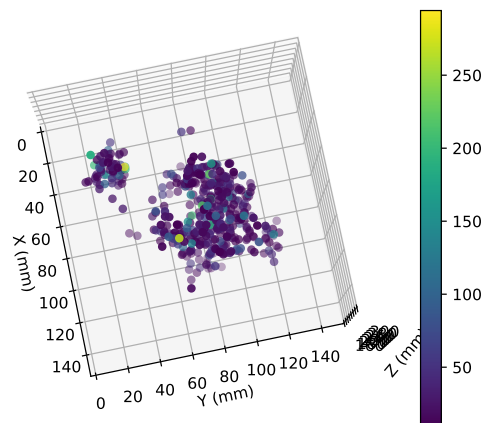
在 ROOT 中提供封装好的向量计算类 TVector3，可以完成上述向量运算。

附录 F 散射成像实验结果

基于第五章搭建的散射成像装置开展了不同的成像实验，验证了系统能稳定运行，本附录将对一些实验结果进行展示。

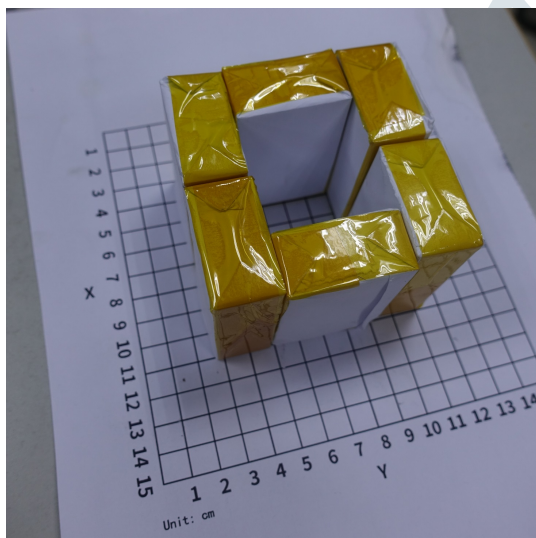


(a) 待测物体图片

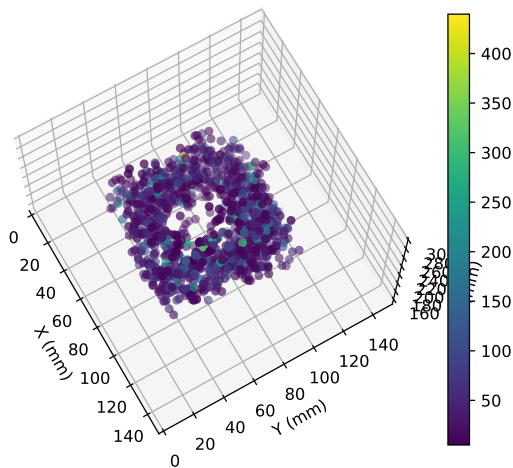


(b) 成像结果

图 F.1 钨块和铁质扳手，测试时间 45 小时

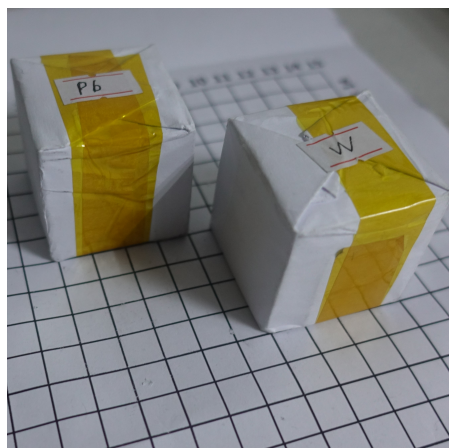


(a) 待测物体图片

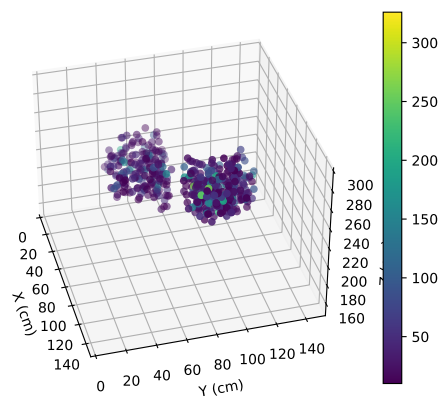


(b) 成像结果

图 F.2 4cm 高的铅块围城一个回形，测试时间 24 小时

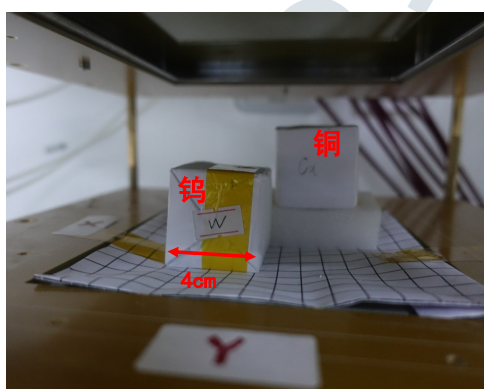


(a) 待测物体图片

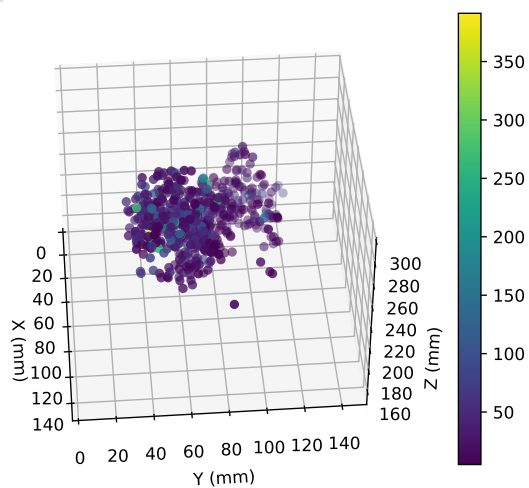


(b) 成像结果

图 F.3 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 钨块和铅块, 测试时间 24 小时

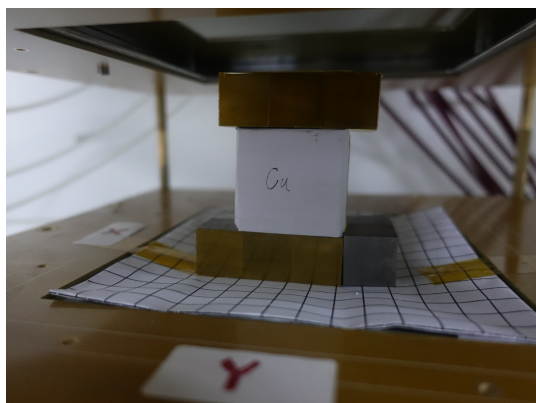


(a) 待测物体图片

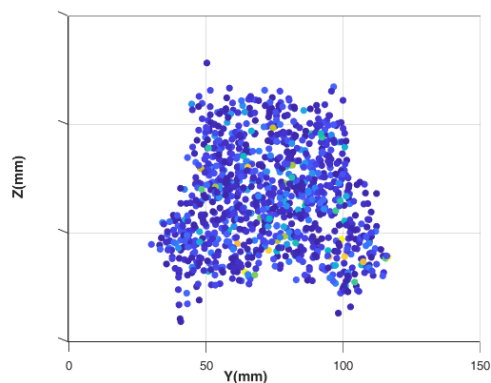


(b) 成像结果

图 F.4 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 钨块和铜块, 测试时间 24 小时

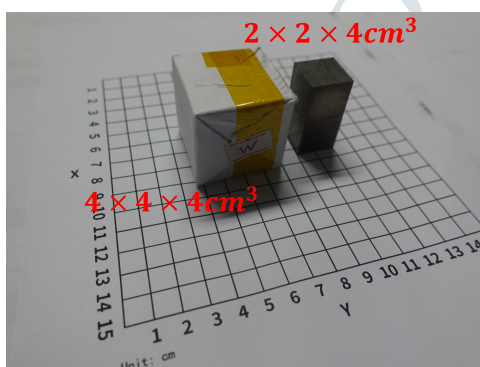


(a) 待测物体图片

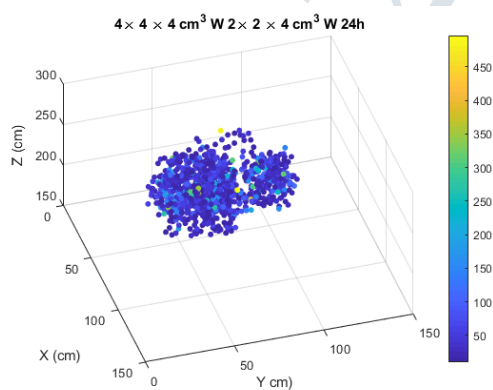


(b) 成像结果

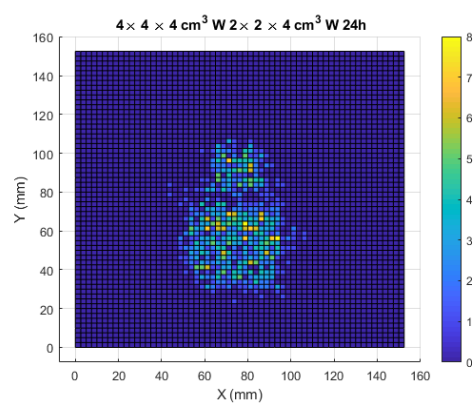
图 F.5 两个 2cm 厚的钨块夹着 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 铜块，测试时间 24 小时



(a) 待测物体图片

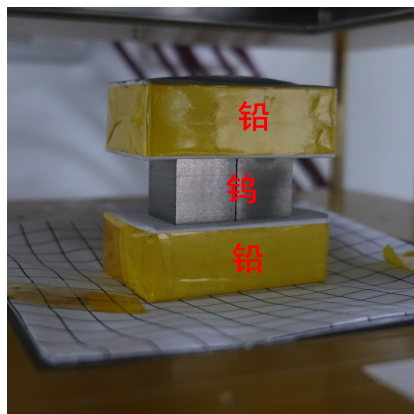


(b) 成像结果

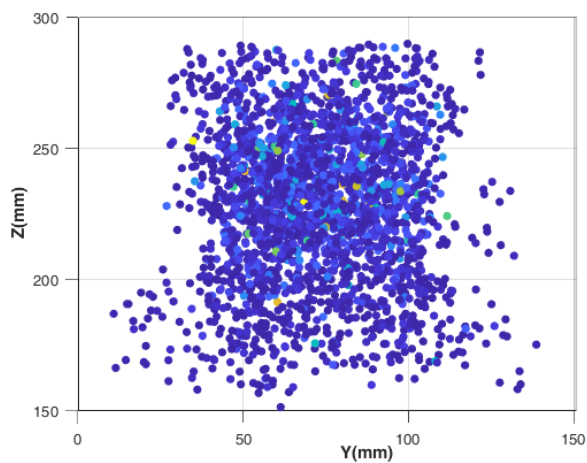


(c) 成像结果

图 F.6 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 和 $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 4\text{cm}$ 的钨块，测试时间 24 小时

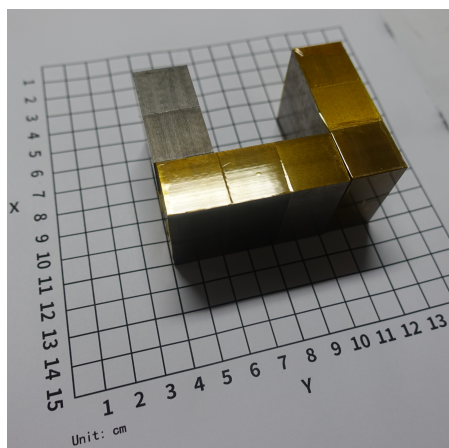


(a) 待测物体图片

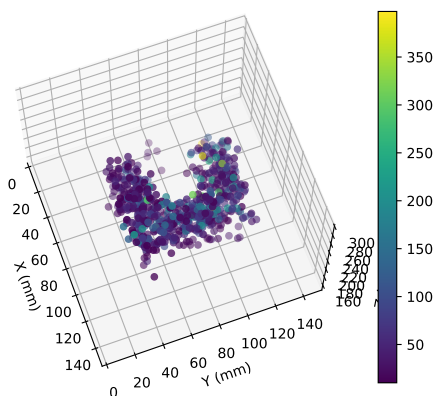


(b) 成像结果

图 F.7 两个 $4\text{cm} \times 6\text{cm} \times 2\text{cm}$ 铅块夹着 $2\text{cm} \times 4\text{cm} \times 2\text{cm}$ 钨，测试时间 24 小时



(a) 待测物体图片



(b) 成像结果

图 F.8 钨，测试时间 24 小时

附录 G 电子学原型系统照片

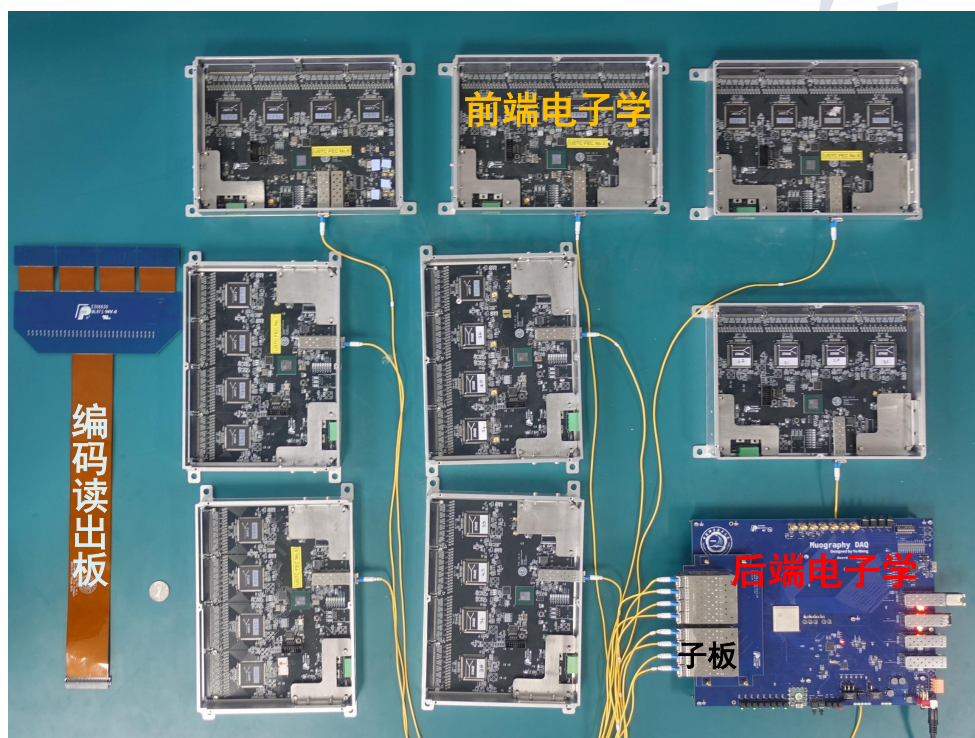


图 G.1 电子学原型系统

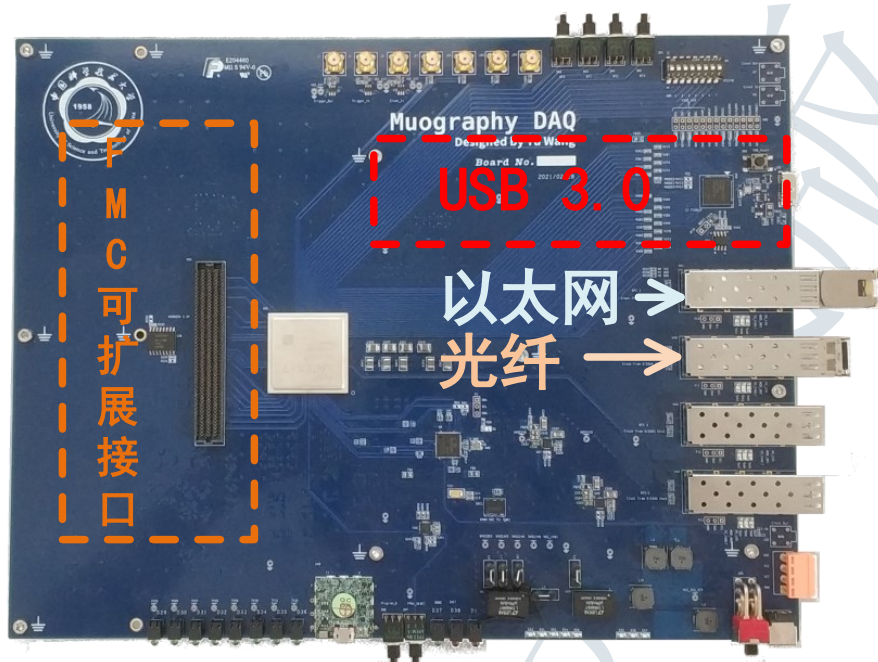


图 G.2 后端电子学照片

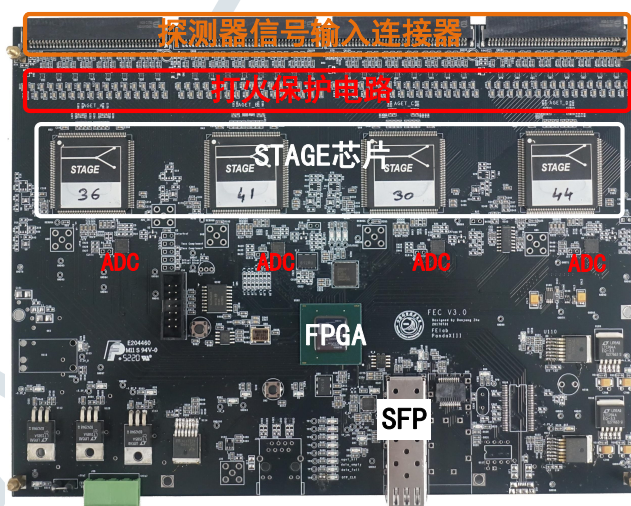


图 G.3 前端电子学板照片

致 谢

本论文是在我的导师刘树彬教授、沈仲弢副研究员和封常青教授的悉心指导下完成的。首先向他们表示诚挚的谢意，感谢他们在过去的六年中对我学习和科研工作的指导。在研究工作中，刘老师准确地把握研究方向，指导我从源头开始了解缪子成像，让我对电子学研究有了深刻的认识；沈老师认真负责，对问题有着独到的见解，总能带领我解决研究中的种种困难，在论文撰写中给予了我非常多细致的指导；封老师对待问题一丝不苟，以严谨的态度激励着我，在与封老师的讨论中让我领悟到不少电子学研究的基本思想，使得我能解决研究中的困难。第一次了解缪子成像，是在一次和刘老师、封老师去开会的途中，当时并没有意识到缪子成像应用的巨大潜力。接下来的几年里，在三位导师的指导下，参与了几项气体探测器读出相关的项目，学习了前端电子学和后端电子学的研究方法，也掌握了不少做科研的技能和思想，为开展本论文研究打下了基础。非常荣幸能在三位导师的培养和指导下，完成研究生阶段的学习和科研工作，再次向各位导师表示由衷地感谢。在今后的工作中，我将继续向他们学习，不断的提升自己。

感谢向本文提供资助和支持的国家自然科学基金杰出青年科学基金项目《核电子学方法研究及应用（No.12025504）》。

感谢快电子学实验室的创始人王砚方教授，在这几年中，有幸多次与王老师进行交流。王老师不仅在研究方法上有深厚的研究，在科研思想和方向上也有着独到的见解。王老师积极的人生态度和不断学习的精神，将一直激励着我在科研的道路上继续前行。

感谢实验室安琪教授。多年前，我对物理电子学实验室还不甚了解时，安老师悉心为我解答疑惑，给我介绍实验室工作的方方面面。安老师治学严谨、知识渊博，使我坚定了物理电子学专业继续深入学习的决心。

感谢探测器团队的张志永老师，本文使用的探测器是由张老师研发而成，在成像系统搭建、成像数据分析方面，张老师给予了我巨大的帮助，每次和张老师的讨论都让我加深了对粒子探测技术的认识。感谢安徽大学文群刚老师，在开展实验过程中，文老师提供了不少有价值的意见和建议；文老师通过其算法对散射成像数据进行分析，验证了本套装置能在半小时完成 4cm 厚的钨材料成像，证明了本套装置的巨大潜力（该部分属于文老师工作，并未在本论文中）。

感谢实验室曹喆老师，曹老师以亦师亦友的身份，在科研工作中给予了我非常大的帮助。感谢实验室赵雷老师，赵老师对科研的执着和奉献，一直是我所敬仰的。还要感谢程伊敏老师、王颖颖老师、王丽老师在科研工作中对我的支持。

感谢同一项目组的水雁斌师弟和刘建国师弟，在你们的帮助下本研究得以顺利开展。感谢探测器组的祁斌斌师弟和刘昱林师弟，与你们讨论让我对成像数据处理有了更深的了解。

感谢本论文的评审专家和答辩委员会专家，诸位专家的批评指证使得本文更加严谨和完善。

感谢为本届毕业生服务的答辩秘书罗来富师弟，师弟不辞辛劳地办理论文和答辩相关的各种手续，给我提供了不少帮助。

在这里，要特别感谢实验室已毕业的张俊斌师兄。初到实验室，张俊斌师兄给予了我莫大的帮助，让我能够快速掌握各项技能和研究方法。感谢实验室杨晨飞师兄、元光远师兄、祝星师兄、董家宁师姐、李诚师兄、马思源师兄、赵申森师兄、王淑文师兄、朱丹阳师姐和洪道金师兄，与你们的学术讨论让我受益匪浅。感谢一同奋斗的陈昊磊、孙振宇、周小雨、宋政奇、鲁佳鸣、牛亚洲、胡佳栋和董若石同学，与你们一起学习让我不断进步。还要感谢实验室罗来富、潘姜、陈朕、董文豪、王力、杨宇宸、王硕、赵珂庆、周安顺、周自衡、刘豪、滕尧、周凡、王佳琪、王君宸、王轶超、赵懋源等师弟在工作中对我的支持。

感谢母校中国科学技术大学。九年时光，如白驹过隙，忽然而已，母校以浓郁的学术氛围、纯粹的学术环境和自由的学术态度，让我从一个什么都不懂的少年，成长为一名完成学术培养的博士。

感谢我的父母对我的无私关怀和鼓励，你们在背后的支持是我前进的动力，我会继续努力。

最后，还要特别感谢我的妻子肖丹，在多年的生活中给了我无数的支持，我们之间的讨论也为我提供了不少学术灵感，还要感谢她为本文文字校对工作所做贡献。

王宇

2021年5月28日

在读期间发表的学术论文与取得的研究成果

已发表论文

1. **WANG Y**, LIU S, FENG C, et al,. Readout Electronics for CEPC Semidigital Hadron Calorimeter Preprototype[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(7): 1064-1069. DOI:10.1109/TNS.2019.2917289.
2. **WANG Y**, LIU S, SHEN Z, et al,. Auto Calibration Method for the Front-end Electronics in Digital Hadron Calorimeter[C]. 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). DOI:10.1109/I2MTC43012.2020.9128494.
3. 元光远, 沈仲弢, **王宇**, 等. 基于 FELIX 的微结构气体探测器读出电子学系统设计 [J]. 原子能科学技术, 2019, 54(6): 1034 - 1040. DOI:10.7538/yzk.2020.youxian.0043.
4. ZHANG J., LIU S, **WANG Y**, et al,. “Transient waveform recording utilizing TARGET7 ASIC” Journal of instrumentation, vol.12, no.2, April, 2017. DOI:10.1088/1748-0221/12/04/T04009.
5. PAN J, FENG C, ZHANG Z, **WANG Y**, et al,. Position Encoding Readout Electronics of Large Area Micromegas Detectors aiming for Cosmic Ray Muon Imaging[C]. 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). DOI:10.1109/NSS/MIC42101.2019.9060024.

会议报告

1. Readout Electronics for CEPC Semi-Digital Hadron Calorimeter Pre-prototype. 2018 IEEE 21th Real-Time Conference (报告 + 海报)
2. Auto Calibration Method for the Front-end Electronics in Digital Hadron Calorimeter. 2020 I2MTC (报告)
3. CEPC 强子量能器 GEM 方案预研进展. 2017 第七届全国先进气体探测器研讨会 (报告)
4. Status of Design and Development of CEPC-DHCAL Prototype Readout Electronics. 2017 1st International Workshop on CEPC (海报)