

分类号: 0572
密 级: 公开

单位代码: 10422
学 号: 201411375



山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

博士学位论文

Dissertation for Doctoral Degree

论文题目: STAR时间投影室内扇区丝室升级和基于GEM及阳极丝面的新型时间投影室阳离子回流抑制的研究

STAR inner TPC MWPC upgrade and studies on ion-back-flow of TPC based on GEM and anode wire grid

作者姓名	王帅
学院名称	前沿交叉科学青岛研究院
专业名称	粒子物理与原子核物理
指导老师	徐庆华 教授
合作导师	许长补 教授

2019年8月31日

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本论文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 王帅 日期： _____

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或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；本人授权山东大学可以将本学位论文全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名： 王帅 导师签名： 徐弘 日期： _____

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 RHIC-STAR实验及iTPC升级介绍	1
1.1 RHIC-STAR实验简介	2
1.1.1 相对论重离子对撞机 (RHIC)	2
1.1.2 STAR探测器	4
1.2 STAR iTPC升级的物理动机及升级内容	8
1.2.1 STAR能量扫描计划	8
1.2.2 iTPC升级内容	11
1.3 小结	11
第二章 iTPC多丝正比室的批量研制	13
2.1 与iTPC研制相关的硬件系统搭建	14
2.1.1 绕丝系统	14
2.1.2 丝张力测试系统	15
2.2 丝框的张力及间距检测	17
2.2.1 丝张力及丝间距扫描测试	17
2.2.2 丝框受力变形分析及张力补偿	21
2.3 iTPC多丝正比室主要部件的设计	23
2.3.1 主体框架	23
2.3.2 信号感应板	26
2.4 iTPC多丝正比室的批量制作	27
2.5 小结	29
第三章 批量制作iTPC多丝正比室的性能测试	31
3.1 iTPC多丝正比室的工作原理	31
3.2 iTPC多丝正比室阳极丝读出的性能测试	34
3.2.1 测试平台搭建	35
3.2.2 增益及能量分辨率的均匀性扫描	36
3.2.3 强辐射下的稳定性测试	39
3.3 iTPC多丝正比室pad读出的性能测试	41
3.3.1 STAR DAQ测试系统简介	41

3.3.2	本底测试	42
3.3.3	脉冲信号捕捉与pad增益测试	43
3.3.4	位置分辨率测试	44
3.4	Run-18中iTPC的试运行表现	47
3.5	小结	48
第四章	下一代对撞机（EIC）及探测器的性能需求	49
4.1	电子-离子对撞机（EIC）简介	49
4.2	传统时间投影室的开关门机制	53
4.3	微结构气体探测器在EIC上应用的可能性	55
4.4	小结	55
第五章	基于气体电子倍增器和阳极丝面的时间投影室设计及原型样机研制	57
5.1	微结构气体探测器（MPGDs）	57
5.1.1	气体电子倍增器（GEM）	57
5.1.2	厚型气体电子倍增器（THGEM）	59
5.1.3	玻璃型气体电子倍增器（G-GEM）	60
5.2	基于GEM及阳极丝面的新型时间投影室的设计思路	61
5.3	原型样机的搭建	62
5.4	探测器测试系统的搭建	65
5.4.1	多道脉冲分析仪测试系统	67
5.4.2	MCA系统刻度	67
5.4.3	气体混合系统	68
5.4.4	对于温度和压强的控制	69
5.4.5	系统屏蔽	70
5.5	小结	71
第六章	基于APDL的时间投影室单元建模	73
6.1	单层GEM的建模	73
6.1.1	单层GEM结构的显微镜观测	73
6.1.2	建立模型单元	73
6.1.3	添加载荷	74
6.1.4	网格划分与求解	76
6.2	双层GEM的建模	78
6.2.1	非交叠状态下的双层GEM	78

6.2.2	交叠状态下的双层GEM	78
6.3	双层GEM加阳极丝的建模	79
6.4	小结	80
第七章	基于Garfield++的时间投影室性能模拟	83
7.1	单层GEM的性能模拟	83
7.1.1	电子及阳离子的传输过程	83
7.1.2	电子的收集效率	85
7.1.3	电子的雪崩增益	85
7.1.4	电子的提取效率	87
7.2	双层GEM的性能模拟	88
7.2.1	非交叠与交叠模式下电子及阳离子的传输过程	88
7.2.2	非交叠与交叠模式下阳离子的回流比率	90
7.2.3	交叠模式下电子的雪崩增益	91
7.2.4	交叠模式下电子的提取效率	92
7.3	双层GEM搭配阳极丝面的性能模拟	93
7.3.1	每一级放大器有效增益的估算	93
7.3.2	传输区场强对于阳离子回流比率的影响	94
7.3.3	探测器各部位对阳离子的吸收比率	94
7.4	小结	96
第八章	基于气体电子倍增器及阳极栅面的时间投影室性能测试	97
8.1	增益及能量分辨率测试	97
8.1.1	^{55}Fe 放射源辐照原理	97
8.1.2	脉冲信号捕捉	98
8.1.3	^{55}Fe 能谱分析	100
8.1.4	有效增益及能量分辨率电压扫描	101
8.2	阳离子回流比率测试	102
8.2.1	实时电流采样	102
8.2.2	阳离子回流比率电压扫描	103
8.2.3	漂移区电场对探测器空间内阳离子密度的影响	106
8.3	计数率测试	107
8.3.1	pad上的计数率	107
8.3.2	阳极丝上的计数率	108
8.4	空间电荷密度估算	109

8.5 小结	111
第九章 总结与展望	113
9.1 总结	113
9.2 展望	114
参考文献	117
攻读博士学位期间发表的论文	123
攻读博士学位期间参加的科研工作	123
附录 A 重要词汇中英文对照	125
附录 B 基于APDL的建模代码	127
B.1 双层非交叠GEM	127
B.2 双层交叠GEM	133

Contents

Chinese Abstract	I
ABSTRACT	III
1 RHIC-STAR experiment and introduction to iTPC upgrade	1
1.1 Introduction to RHIC-STAR experiment	2
1.1.1 Relativistic Heavy Ion Collider(RHIC)	2
1.1.2 STAR detector	4
1.2 Physical motivation and contents of STAR iTPC upgrade	8
1.2.1 Plan of STAR Beam Energy Scan	8
1.2.2 Contents of iTPC upgrade	11
1.3 Summary	11
2 Mass production of iTPC MWPC	13
2.1 Construction of hardware system related to iTPC development	14
2.1.1 Wire winding system	14
2.1.2 Wire tension test system	15
2.2 Tension and pitch test of wire on frame	17
2.2.1 Wire tension and wire pitch scan	17
2.2.2 Analysis for wire frame deformation and tension compensation	21
2.3 Design for main components of iTPC MWPC	23
2.3.1 Main body frame(strongback)	23
2.3.2 Signal induction board (padplane)	26
2.4 Mass production of the iTPC MWPC	27
2.5 Summary	29
3 Performance tests of iTPC MWPC	31
3.1 Working principle of iTPC MWPC	31
3.2 Performance tests for anode wire readout of iTPC MWPC	34
3.2.1 Construction of the test platform	35
3.2.2 Scan for the uniformity of gain and energy resolution	36
3.2.3 Stability test under strong radiation	39
3.3 Pad readout tests for the iTPC MWPC	41

3.3.1	Introduction to STAR DAQ test system	41
3.3.2	Background test	42
3.3.3	Capture of pulse signal and gain test on pad	43
3.3.4	Position resolution test	44
3.4	Performance of one iTPC sector at RHIC run-18	47
3.5	Summary	48
4	The next generation collider(EIC) and detector requirment	49
4.1	Introduction to EIC	49
4.2	Gating grid mechanism of the traditional TPC	53
4.3	Possibility of application for Micro-Pattern Gas Detectors in EIC	55
4.4	Summary	55
5	TPC design based on GEM and anode wire grid and prototyping	57
5.1	Micro-Pattern Gas Detectors (MPGDs)	57
5.1.1	Gas Electron Multiplier (GEM)	57
5.1.2	Thick Gas Electron Multiplier (THGEM)	59
5.1.3	Glass Gas Electron Multiplier (G-GEM)	60
5.2	Design of the new TPC based on GEM and anode wire grid	61
5.3	Construction of prototype	62
5.4	Setup of detector testing system	65
5.4.1	The MCA test system	67
5.4.2	Calibration for MCA test system	67
5.4.3	The gas mixing system	68
5.4.4	Control of temperature and pressure	69
5.4.5	System shielding	70
5.5	Summary	71
6	Modeling of TPC unit based on APDL	73
6.1	Modeling of single-layer GEM	73
6.1.1	Microscopic observation of single-layer GEM structure	73
6.1.2	Building the model unit	73
6.1.3	Load application	74
6.1.4	Mesh generation and solution	76
6.2	Modeling of double-layer GEM	78
6.2.1	Double-layer GEM under non-staggered mode	78

6.2.2	Double-layer GEM under staggered mode	78
6.3	Modeling of double-layer GEM with anode wire	79
6.4	Summary	80
7	Performance simulation of TPC based on Garfield++	83
7.1	Performance simulation of single-layer GEM	83
7.1.1	Transport processes of electrons and ions	83
7.1.2	Collection efficiency of electrons	85
7.1.3	Avalanche gain of electrons	85
7.1.4	Extraction efficiency of electrons	87
7.2	Performance simulation of double-layer GEMs	88
7.2.1	Transport processes of electrons and ions under non-staggered and staggered mode	88
7.2.2	IBF ratio under non-staggered and staggered mode	90
7.2.3	Avalanche gain of electrons under staggered mode	91
7.2.4	Extraction efficiency of electrons under staggered mode	92
7.3	Performance simulation of double-layer GEM with anode grid	93
7.3.1	Estimation of effective gain for each stage of amplifier	93
7.3.2	The effect of E-field in transfer region on IBF	94
7.3.3	Absorption ratio of ions by each part of the detector	94
7.4	Summary	96
8	Performance tests of TPC based on GEM and anode grid	97
8.1	Gain and energy resolution measurements	97
8.1.1	Radiation principle of ^{55}Fe	97
8.1.2	Capture of pulse signal	98
8.1.3	Analysis of the ^{55}Fe spectrum	100
8.1.4	Voltage scan of effective gain and energy resolution	101
8.2	IBF ratio measurements	102
8.2.1	Sampling of the real-time current	102
8.2.2	Voltage scan of IBF ratio	103
8.2.3	Effect of E-field in drift volume on the ion density in the detector	106
8.3	Counting rate measurements	107
8.3.1	Counting rate of pad	107

8.3.2	Counting rate of the anode wire	108
8.4	Estimation of the space charge density	109
8.5	Summary	111
9	Conslusions and Prospects	113
9.1	Conslusions	113
9.2	Prospects	114
	References	117
	Papers published during PhD study	123
	Projects participated during PhD study	123
A	English-Chinese contrast of important vocabulary	125
B	Modeling code based on APDL	127
B.1	Double-layer GEM with non-staggered mode	127
B.2	Double-layer GEM with staggered mode	133

摘 要

为了在更深层次上研究量子色动力学 (Quantum ChromoDynamics, QCD) 的相变过程及寻找可能存在的QCD相变临界点, RHIC STAR计划在二期能量扫描结束后对探测器进行升级, 其中内扇区时间投影室iTPC成为此次升级的核心部分。iTPC升级项目计划把内扇区丝室读出覆盖率由20%提升至100%并升级相应的读出电子学。探测器经过升级后预期将获得更好的动量分辨率, 更好的 dE/dx 分辨率, 并在高快度区间 ($1 < |\eta| < 1.5$) 大幅提升对粒子径迹的重建效率。

在iTPC展开量产工作前, 考虑到升级指标对多丝正比室三层丝面的严苛要求, 分别为其搭建了绕丝系统和丝张力测试系统并实现了自动化。经过对其精度和稳定度的测试, 发现这两套系统均可以达到较高的物理精度要求。针对绕丝过程中出现的丝张力不均匀现象, 使用ANSYS对丝框进行受力变形分析后基于LabVIEW开发出一套张力实时补偿模块成功解决了该难题。iTPC进入正式的批量生产阶段后, 每个生产环节都得到了严格的把控。在性能测试环节, 为其搭建了一整套硬件设备, 整个测试基于 ^{55}Fe 放射源及高频X射线管, 并辅以多道脉冲分析仪、示波器、STAR电子学等先进数据采集仪器。

对于iTPC的性能测试主要分为丝端读出测试和pad读出测试。在丝端读出测试中, 探测器的增益可以稳定在2500左右 (阳极丝工作电压1120V) 且在这个增益附近具有良好的正比性, 增益均匀性好于2%, 能量分辨率可以达到10%左右。在高强度X射线辐照下 (X射线频率 $2.3 \times 10^5 \text{ Hz}$, 射线管电压25kV, 射线管电流 $500 \mu\text{A}$), 探测器可以稳定工作并且漏电流保持在500nA左右。在使用STAR电子学系统对pad读出的测试中发现iTPC每个pad的本底在35至60ADC内浮动, pad感应全信号电量与阳极丝信号电量比达到1: 1.98, PRF响应函数峰值即单pad与阳极丝信号电量最大占比最大达到30%左右, 且位置分辨率达到2.5mm左右。

后期将iTPC运往BNL实验室进行Run-18测试并经过200GeV Isobar和27GeV Au+Au事例重建后发现, 相比于旧的iTPC, 升级后的iTPC其打击点数由最多的45个提升至72个。横动量 P_T 的测量阈值降为60MeV/c, 赝快度接受区间 η 向前延伸了0.4个单位, 并且 dE/dx 分辨率也都得到了明显的提升。截止到2019年2月, STAR完成了对全部iTPC探测器的安装调试工作并正式开启了二期能量扫描计划, STAR iTPC升级项目顺利完成。

相较于目前世界上正在运行的对撞机, 未来的对撞机 (比如EIC) 将具有高出几个量级的亮度及碰撞率, 而传统的多丝正比室由于其开关门机制会周期性的带来一段延迟时间使探测器无法读出, 所以开发一种可连续读出

的时间投影室便成为一项研发任务。经过STAR iTPC升级项目，我们在此基础上设想一种新型时间投影室结构：保留阳极丝，撤换掉阴极丝和门极丝，摒弃掉传统多丝正比室的开关门机制，取而代之的是气体电子倍增器（Gas Electron Multiplier, GEM）。这样阳极丝依然提供主要的信号放大作用，一层或多层GEM在较低的工作电压下工作提供辅助放大并主要用来抑制阳离子的回流，从而实现信号的连续读出以适应高亮度环境。

探测器搭建完毕后，其余的硬件系统如多道脉冲分析仪测试系统、混气系统、温度及压强监控系统也同时建立起来。根据GEM上孔的正六边形排列规则，作者分别尝试了两种交叠方案，第一种双层GEM平移交叠方案可以在模拟中达到100%的交叠状态，但是在实验中却受制于装配精度而不适合实际应用，只能作为模拟理论的参考。第二种双层GEM旋转交叠方案受装配精度的影响较小，此方案在性能测试环节中得到了实际应用。在APDL及Garfield++模拟的帮助下，首先对单层GEM及双层GEM的电子及阳离子的传输规律、电子的收集效率、电子的提取效率、增益等重要属性进行了模拟并得到了量化结果。在最终对双层GEM加阳极丝面的模拟中发现该配置在整个模拟过程中表现稳定，经过电场优化，可以将阳离子回流比率压制到较低的水准。其中和STAR TPC环境变量类似的参数（气体组分、温度、气压等）也都被证明可以为探测器提供稳定的工作环境。

经过全面的性能测试发现探测器有效增益随着阳极丝电压升高（固定GEM工作电压）而呈指数增长，工作电压由940V升至1120V的过程中，探测器的有效增益由2500左右提升至44000左右。其中低有效增益更符合探测器的实际应用，在有效增益2500左右时，探测器的能量分辨率可以达到10%左右。对IBF的测量精度可以达到5%左右，当漂移区场强设置为0.1kV/cm，传输区场强设置为4.0kV/cm，阳极丝工作电压设置为940V，双层GEM工作电压设置为255V时，阳离子回流比率可以被抑制到最好的0.58%，此时参数 ϵ （即 $G_{\text{eff}} \cdot \text{IBF}$ ）可以达到14左右。经过对该新型时间投影室在实际工作环境下将带来的空间阳离子密度分布的评估后，发现该探测器设计方案未来在EIC上的e+p碰撞中得到实际应用的潜力是最大的，虽然EIC的碰撞率足够高，但e+p碰撞的事例多重数却远远小于p+p碰撞，且明显低于Au+Au碰撞。最后带来的空间电荷密度将类似于目前RHIC-STAR上的Au+Au碰撞。这个量级的空间电荷密度处于可以接受的范围，因此该设计可以作为未来在EIC上得到应用的方案之一。

关键词: RHIC STAR, iTPC升级, 多丝正比室, GEM, Garfield++, 阳离子回流

ABSTRACT

In order to study the phase transition process of QCD at a deeper level and search for the possible critical point, RHIC STAR plans to upgrade the detector after the Beam Energy Scan-I and the upgrade of the inner TPC(iTPC) becomes the core part of this project. The iTPC upgrade program plans to increase the pad coverage from 20% to 100% and upgrade the corresponding readout electronics. After the upgrade, the detector is expected to achieve better momentum resolution, better dE/dx resolution, and the reconstruction efficiency of the particles in the high pseudo rapidity range($1 < |\eta| < 1.5$) will be greatly enhanced.

Before the iTPC mass production, considering the stringent requirement of upgrade index on three-layer wires of MWPC, We built and automated the wire winding system and wire tension test system respectively. After accuracy and stability tests, we found that the systems can meet the higher physical accuracy requirements. Aiming at the non-uniformity of wire tension in the winding process, the author developed a real-time tension compensation module based on LabVIEW after using ANSYS to analyze the force and deformation of the frame. Then after entering the formal stage of mass production, every step of production has been strictly controlled. In the performance test, we built a set of hardware equipment which is based on ^{55}Fe radiation source and high frequency X-ray tube, supplemented by MCA, oscilloscope, STAR electronics and other advanced data acquisition instruments.

The iTPC performance tests include wire readout test and pad readout test. In the wire readout test, the gain could be stabilized at about 2500 (anode wire working voltage is 1120V) and the detector has good proportional near the gain of about 2500. The gain uniformity is better than 2%, and the energy resolution could reach about 10%. Under high-intensity X-ray irradiation(X-ray frequency $2.3 \times 10^5 \text{HZ}$, ray tube voltage 25kV, ray tube current $500 \mu\text{A}$), the detector could work stably and the leakage current is maintained at around 500nA. In the test of pad readout using STAR electronics system, it was found that the background of each pad of iTPC fluctuated within 35-60ADC, the ratio of total induced signal charge on all pad to that on anode wire is 1:1.98, the peak value of PRF response function(the ratio of induced signal charge on one pad to that on anode wire) is about 30%, and the position resolution could reach about 2.5mm.

Then one iTPC sector was shipped to BNL Laboratory for Run-18 test and

the reconstruction of 200 GeV Isobar and 27 GeV Au+Au collisions show that, compared with the old iTPC, the upgraded iTPC's hit points increase from 45 to 72. The measurement threshold of transverse momentum P_T is reduced to 60 MeV/c, the pseudo-rapidity acceptance interval η extends forward by 0.4 units, and the resolution of dE/dx has also been significantly improved. By February 2019, STAR has completed the installation and commissioning of all iTPC detectors and launched the Beam Energy Scan-II officially. The STAR iTPC upgrade project was completed successfully.

Future colliders(such as EIC) will have several orders of magnitude higher luminosity and collision rate than the colliders currently in operation in the world. The traditional MWPC has periodic delay due to its gating grid mechanism, which makes the detector unreadable. Therefore, the development of a continuous readable TPC has become a task. Based on the STAR iTPC upgrade project, we propose a new time projection chamber structure: the anode wire is kept, and the cathode wire and gated wire are replaced by GEM, then the traditional door opening and closing mechanism is abandoned. In this way, the anode wire still provides the main signal amplification function. One or more layers of GEM provide auxiliary amplification under low working voltage which are mainly used to restrain the ions flowing back. Then the continuous readout of signal could be realized to adapt to high luminosity environment.

The TPC prototype was built, and the test system including MCA test system, gas mixing system, temperature and pressure monitoring system were also established. According to the regular hexagonal arrangement rules of holes on GEM, the author tried two overlapping schemes. The first two-layer GEM translation overlapping scheme can reach the 100% overlapping in simulation, but it is limited by assembly accuracy in experiment and is not suitable for practical application. It serves as a reference for simulation theory. The second two-layer GEM rotation overlapping scheme is less affected by assembly accuracy which was applied in performance testing. With the help of APDL and Garfield++ simulation, we firstly studied single-layer GEM and double-layer GEM. Important properties such as electron and ion transport, electron collection efficiency, electron extraction efficiency, gas gain has been quantified. In the final simulation of double-layer GEM plus anode wire grid, it is found that the configuration is stable and the IBF ratio could be suppressed to a low level by optimizing the electric field. The parameters similar to the STAR TPC environment variables

(gas composition, temperature, pressure) have also been proved to be possible for providing a stable working environment for the detector.

A comprehensive performance tests show that the effective gain of the detector increases exponentially with the increase of the anode wire voltage (fix GEM working voltage). During the process of the working voltage increasing from 940V to 1120V, the effective gain of the detector increases from about 2500 to about 44000. And low effective gain is more suitable for practical application. When the effective gain is about 2500, the energy resolution of the detector could reach about 10%. The accuracy of IBF ratio measurement could reach about 5%. When $E_{\text{drift}}=0.1\text{kV/cm}$, $E_{\text{transfer}}=4.0\text{kV/cm}$, $V_{\text{anode wires}}=940\text{V}$, $\Delta V_{\text{GEM}_{\text{upper}}}=\Delta V_{\text{GEM}_{\text{lower}}}=255\text{V}$, the IBF ratio could be suppressed to the best of 0.58%, and the parameter $\epsilon(G_{\text{eff}}*\text{IBF})$ could reach about 14. After evaluation of the ion density distribution resulted from the new TPC in the working environment, we found that the design has the greatest potential for practical application in e+p collisions on EIC in the future. Although the collision rate of EIC is high enough, the multiplicity of e+p collisions is much less than that of p+p collisions, and is much lower than that of Au+Au collisions. And the space charge density will be similar to that of Au+Au collisions in RHIC-STAR. The level of space charge density is in an acceptable range, so the design can be used as one of the schemes for EIC in the future.

Key words: RHIC STAR, iTPC upgrade, MWPC, GEM, Garfield++, IBF

第一章 RHIC-STAR实验及iTPC升级介绍

从古代文明到现代文明，人类对物质世界的认知经历了漫长而又曲折的过程。在这个过程中，人类对物质世界的研究逐渐从宏观世界深入至微观世界。古希腊哲学家德谟克利特创立了原子唯物论，认为物质世界的本源由原子和虚空组成，并且原子是不可分割的最小微粒。经过一段漫长的发展，在19世纪初，英国科学家约翰·道尔顿在古希腊原子唯物论和牛顿微粒说的基础上总结并提出了原子论。直到19世纪末至20世纪初，原子核和核外电子的发现证明原子并非最小的粒子，它是可以继续分割的。所以粒子物理学便在20世纪初应运而生。作为物理学的一个分支，该学科研究组成物质的基本粒子及他们之间的相互作用力。粒子物理学的发展史最早可以追溯到1897年，英国物理学家约瑟夫·约翰·汤姆逊在研究阴极射线时发现电子，这是人类史上发现的第一个基本粒子。1918年英国物理学家欧内斯特·卢瑟福用 α 粒子轰击氮原子核发现质子（质子属于符合粒子，并不属于基本粒子）并预言了中子的存在。1923年美国物理学家康普顿发现了康普顿效应，并借助于阿尔伯特·爱因斯坦的光子理论共同证实了光子的存在，光的波粒二象性迅速获得了广泛的承认。1932年英国物理学家詹姆斯·查德威克在用 α 粒子轰击铍的实验中发现了中子。在当时，原子核由质子和中子组成，电子围绕原子核运动成为了当时描述物质世界的最基本法则。1935年汤川秀树预测了强作用力的传递粒子-介子的存在，该预测在1947年得到证实。1930年，奥地利物理学家沃尔夫冈·泡利提出中微子存在的假设，并且在1956由美国物理学家弗雷德里克·莱因斯在实验上首次获得中微子存在的证据，他利用核反应堆产物的 β 衰变产生出了反中微子。此后又陆续发现众多的粒子，比如从宇宙线中发现 μ 子，后来证实它不参与强相互作用，并与电子一同归类为轻子。自20世纪50年代之后，各种加速器和粒子探测器有了长足的发展，所以对基本粒子的研究进入了新阶段。1964年盖耳曼和茨威格提出了夸克模型，并得到了高能中微子对质子和中子的深度非弹性散射实验的支持，该实验显示出质子和中子内部存在点状结构，这些点状结构可以认为是夸克存在的证据。1975年重轻子 τ 被发现，并发现与之相对应的 τ 中微子存在的迹象。从1968年在斯坦福直线加速器上深度非弹性散射实验发现上夸克及下夸克，到1995年在费米实验室被观测到的顶夸克，期间共观测到6种夸克的存在。经过漫长发展，一套描述强力、弱力及电磁力这三种基本力及组成所有物质的基本粒子标准模型理论被逐步建立和完善起来。2013年，欧洲核子中心的大型强子对撞机实验证实了希格斯玻色子的存在，这个发现有力地支持基本粒子通过与希格斯场相互作用而获得质量的机制。

如今，粒子物理学的发展不再像以前仅仅局限在小型实验室内，而是依赖于大科学装置，以国际合作组的形式组织各个国家的专家和学者来进行明确分工。目前世界上粒子物理学主要的大科学装置及国际合作团队有：欧洲核子中心（CERN）的大型强子对撞机（LHC），美国布鲁克海文国家实验室（BNL）的相对论重离子对撞机（RHIC），斯坦福直线加速器中心（SLAC），中国高能物理研究所（IHEP）的正负电子对撞机（BEPC），以及中国大亚湾（JUNO）反应堆中微子实验等。对于未来新物理前沿的挑战，比如暗物质和暗能量的本质，超对称粒子是否存在等重量级课题，要寻找它们的答案，必然对下一代对撞机技术、探测器技术、数据获取及分析技术提出了更高的要求。本文前三章的内容将以RHIC-STAR实验为基础，围绕STAR iTPC升级项目，来对自己所参与的工作做一个简单的总结。

1.1 RHIC-STAR实验简介

1.1.1 相对论重离子对撞机（RHIC）

布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机（Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC）是美国能源部核物理项目下的前沿研究设施，与LHC同为世界上最大的重离子对撞机，并且是目前世界上唯一一台自旋极化对撞机[1]。在1999年，该对撞机连同附带的四个探测器（BRAHMS、PHENIX、PHOBOS、STAR）按照计划如期完工。在2000年的第一次运行期间，所有4个探测器一同调试并收集了大量数据。通过以相对论速度（光速的99.995%）运动的离子的互相对撞，RHIC物理学家模拟了宇宙大爆炸后不久宇宙中存在的原始物质形态，并且通过自旋极化质子的对撞探索了质子的自旋结构。2010年，RHIC物理学家公布了早期实验的温度测量结果，结果表明，在Au+Au碰撞中达到了超过345MeV（7万亿华氏度）的温度，并导致“正常物质”的坍塌和类液态的夸克胶子等离子体的产生。

RHIC是交叉环形加速器，两个独立的环（分为“蓝色”环和“黄色”环）以相反的方向分别循环存储重离子或极化质子。如图 1.1所示，其中的双存储环是六边形的，周长为3834米，边缘部分略带弯曲。在其中循环存储的粒子通过1740个超导磁体（铌钛导体）实现偏转和聚焦（偶极磁铁的工作磁场为3.45T）。两个环共有6个交叉点（对撞点），交叉点使用类时钟位置标注，其中的两个大型实验STAR和PHENIX分别位于6点钟和8点钟位置。对撞粒子在到达存储环之前需要经过几级助推器。首先需要通过电子束离子源（EBIS）产生出最初的离子。而对于质子，则使用200MeV直线加速器（Linac）来达到获取目的。以金核为例，离开EBIS的金核具有每个核子2MeV的动能，并

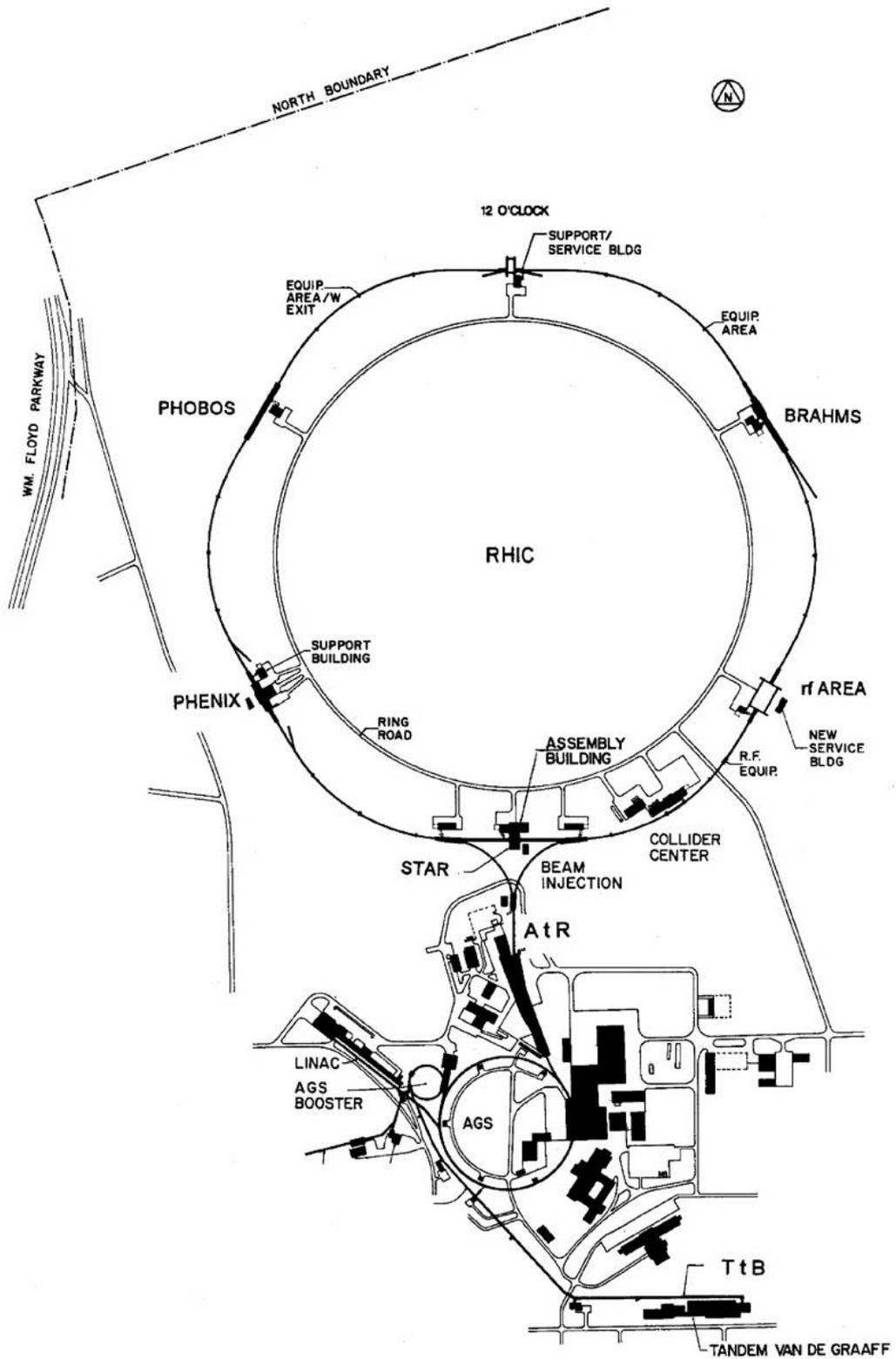


图 1.1: RHIC及周边实验设施详细布局

且携带电荷量 $Q=+32e$ 。然后通过Booster同步加速器将粒子加速到每个核子100MeV的动能并射入交替梯度同步加速器（AGS）中。最终每个核子达到8.86GeV的动能及 $Q=+79e$ 的电荷量并通过AGS传输线进入到存储环中[2]。

迄今为止，在RHIC上实现的对撞粒子组合有多种但主要为Au+Au及p+p。对于Au+Au碰撞，质心能量通常为每个核子对200GeV，最低可以低至每个核子对7.7GeV。在设计初期，其平均亮度为 $2 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，经过多年的发展及冷却技术的应用，目前对撞机的Au+Au碰撞亮度可以达到 $87 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

1.1.2 STAR探测器

STAR探测器是美国布鲁克海文国家实验室RHIC下四个大型探测器实验中目前唯一正在运行的探测器，它的结构如图 1.2所示[3]。其主要科学方向是研究夸克胶子等离子体的形成及特征。夸克胶子等离子体是一种被认为以足够高的能量密度存在的物质状态，对它的发现及研究有助于物理学家更好的理解宇宙大爆炸后宇宙内物质的构成及演化，下一节将会对其进行具体介绍。

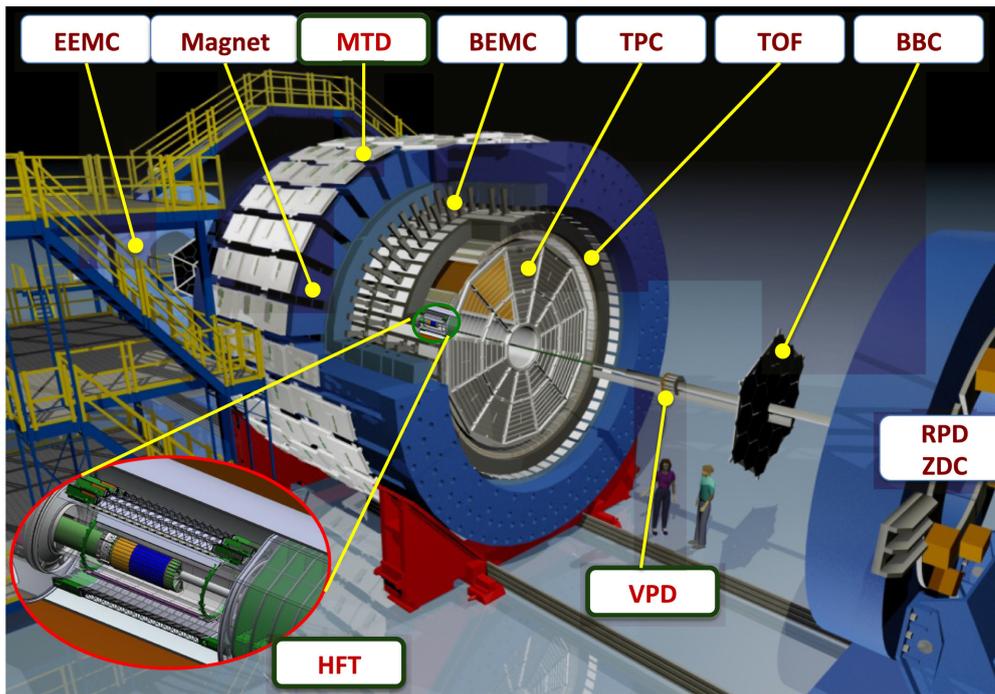


图 1.2: STAR探测器结构示意图

与其他物理实验不同，由于高能核碰撞中形成的物理系统具有复杂性而不可能通过单一的某一项测量便得出科学结论，必须从多方面不同视角加以研究，以获得关于夸克胶子等离子体存在的有力的、全面的证据。因此，STAR探测

器由多种类型的子探测器组成，每种子探测器专门用于探测某些类型的粒子或测量它们的运动特性。这些子探测器在数据采集过程以及后续的数据分析过程中协同工作，可以更加全面的对碰撞结果做出分析。按照功用可以把STAR探测器包含的各类子探测器归纳为以下几类（所有探测器的测量覆盖区间都可以在表 1.1进行查阅）：

顶点探测器	中心快度区间探测器	前端快速探测器
BBC: $2.2 < \eta < 5.0$	MTD: $ \eta < 0.5$	FMS: $2.5 < \eta < 4.0$
VPD: $4.25 < \eta < 5.1$	TOF: $ \eta < 0.9$	RPD: $7.0 < \eta < 9.0$
ZDC: $ \eta > 6.0$	BEMC: $ \eta < 1.0$	
	EEMC: $1.07 < \eta < 2.0$	
	TPC: $ \eta < 1.5$ (升级前)	

表 1.1: STAR各子探测器测量覆盖区间[4]

（1）顶点探测器

零度量能器（Zero Degree Calorimeter, ZDC）位于RHIC偶极磁铁的下游，在探测器的两侧各有一个，主要用于引导对撞束流并提供重离子对撞最小偏差事例的触发（P+P碰撞除外），而且同时可以监控探测器内每个区域的反应率[5, 6]。

束流计数器（Beam-Beam Counter, BBC）的作用是为P+P碰撞提供最小偏差触发。两个BBC模块内置在探测器磁铁的东西两级，每个模块由18个内（小）和18个外（大）闪烁体瓷片按照环形叠加而成并覆盖整个方位角（ 2π ）。

顶点位置探测器（Vertex Position Detector, VPD）主要用于测量来自 π^0 衰变的瞬发光子的到达时间[7]。测量击中每个VPD模块的光子的平均到达时间的差异可以得到沿着对撞束流原初碰撞顶点的位置。在重离子碰撞的早期阶段会产生出大量的 π^0 ，因此VPD的工作效率相当高。而在P+P碰撞中， π^0 的生成率非常低，这时候探测器主要依赖于BBC进行测量。

（2）中心快度区间探测器

电磁量能器（Electromagnetic Calorimeter, EMC）部分包含桶身电磁量能器（Barrel Electromagnetic Calorimeter, BEMC）[8]和端盖电磁量能器（Endcap Electromagnetic Calorimeter, EEMC）[9]，两者主要由铅板和塑料闪烁体构建而成。其中BEMC由4800个独立的子模块组成，每个子模块又包含300个触发器。EEMC的工作原理及构成与BEMC相似，两者共同为触发系统提供触发数据，并帮助探测器寻找喷注和稀有粒子。

飞行时间探测器（Time of Flight detector, TOF）共包含3840个多间隙电阻板室（Multi-gap Resistive Plate Chamber, MRPC）模块，并安装在STAR TPC外围的120个托盘上。通过记录对撞时间点以及击中飞行时间探测器时间点，再结合时间投影室等探测器计算整个径迹的路程，可以得出粒子运动的速度，从而实现粒子鉴别[10, 11, 12]。

μ 子望远镜探测器（Muon Telescope Detector, MTD）的核心部分同样基于MRPC模块[13]。其附带的模块及其铁隔板层统一安装在探测器磁铁的外部，而铁隔板层可以吸收除 μ 子外的绝大多数粒子。在捕捉 μ 子的过程中，需要将MTD上的击中时间与VPD上的击中时间进行比较，以确定在MTD上命中的 μ 子是否源自顶点探测器VPD。

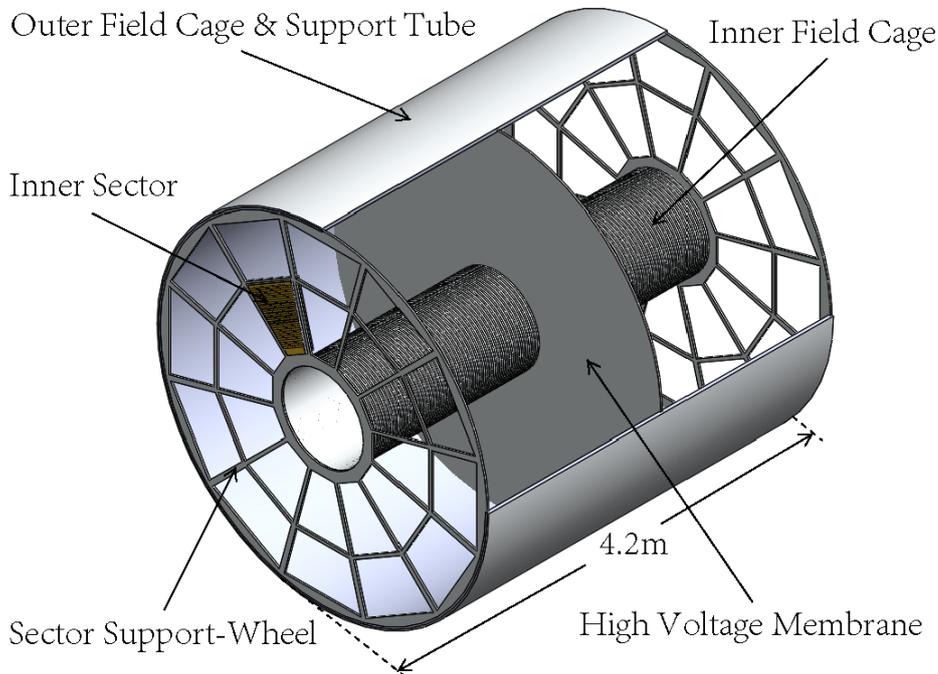


图 1.3: STAR TPC结构示意图

（3）前端快速探测器

前端介子谱仪（Forward Meson Spectrometer, FMS）主要用来研究核子结构。它由1264个铅玻璃切伦科夫探测器阵列组成，用于测量高速运动的光子和电子并同时具备触发功能。

罗马罐式探测器（Roman Pot Detector, RPD）由位于ZDC附近对撞束流下方的4个模块组成。每个模块包含4个硅条探测器以及一个用于触发的闪烁体，闪烁体的每一侧都装有一个光电倍增管（PMT），每个闪烁体上沉积的能量和

击中时间都可以精确测量。

项目	尺寸
TPC的总长度	4.20m (中心高压膜两侧各2.1m)
TPC漂移区的外直径	4.00m
TPC漂移区的内直径	1.00m
中心高压膜至阴极丝平面距离	2.09m
中心高压膜直径	4m
中心高压膜电势	28000V
工作气体	P10 (10%CH ₄ +90%Ar)
内部气体压强	高于大气压2mbar
电子漂移速率	通常为5.45cm/ μ s
电子横向扩散	230 μ m/ $\sqrt{\text{cm}}$ (140 V/cm, 0.5T)
电子纵向扩散	360 μ m/ $\sqrt{\text{cm}}$ (140 V/cm, 0.5T)
内扇区多丝正比室数量	24 (每个端盖含12个)
外扇区多丝正比室数量	24 (每个端盖含12个)
信噪比	20:1
STAR电子学成型时间	180ns (半高宽度)
STAR电子学动态范围	10bits
信号采样率	9.4MHz
信号采样深度	512 time buckets

表 1.2: STAR TPC基本工作参数列表[15]

(4) 核心探测器

时间投影室 (Time Projection Chamber, TPC) [14]如图 1.3所示, TPC外观为一圆柱形桶装结构, 总长为4.2米, 桶底端盖直径为4米, 内部为一个封闭的电场笼, 电场强度为135V/cm。TPC的工作气体为P10 (90%Ar+10%CH₄), 因为它可以使漂移电子具有相对较快且稳定的漂移速度, 并可以使其在较低的电场强度下达到峰值。而且P10对温度和压力的微小变化不敏感, 在高于标准大气压2mbar的气压下进行工作, 以允许有效的反馈回路来调节TPC内部的压力, 并防止氧气扩散到TPC中。使TPC内电子漂移所需的均匀电场由位于TPC中心的中心高压膜和底部端盖探测器的阴极丝来共同提供。电子漂移路径高达2.1米, 因为STAR所要求的径迹重建精度在亚毫米级别, 所以良好的电场均匀性至关重要。外部它被一个大型电磁铁所包裹, 工作磁场强度通常为0.5T。它可以在100MeV/c至1Gev/c的动量范围内通过测量电离能损 (dE/dx) 来鉴别粒子, 并且可以在100MeV/c至30GeV/c内对粒子的动量进行

测量。STAR TPC两侧的端盖分为内扇区和外扇区，每一个扇区每一侧共包括12个多丝正比室。每一个多丝正比室由传统的阳极丝、阴极丝、门极丝所构成。阳极丝通常在1120V的工作电压下工作，为漂移电子提供雪崩增益。阴极丝则接地保持电势为0V，一方面可以吸收部分雪崩中产生的回流阳离子，另一方面可以保持阳极丝与阴极丝之间的均匀电场。门极丝通过周期性的开门和关门来吸收剩余的所有阳离子。

当TPC处于工作状态时，初级电离粒子的漂移路径可以通过它们与气体相互作用后产生的次级电子来重建。次级电子漂移到TPC的一端，它们的位置由桶部端盖的多丝正比室记录，并用pad来读取。表 1.2 列出了STAR TPC的一些基本工作参数。漂移过来的次级电子首先会经过间隔4mm且直径为 $20\mu\text{m}$ 的阳极丝面。当次级电子漂移到阳极丝附近高场强区域时，漂移速度会急剧增长并产生出大量的雪崩电子，其增益通常可以达到1000至3000。在雪崩中产生的阳离子会在阳极丝下方的pad上产生短暂的脉冲信号，并且由STAR电子学将其放大、整形最终数字化以ADC的形式记录下来。在雪崩中产生的阳离子通常会同时在相邻的几个pad上感应出正信号，利用电荷重心法可以重建出雪崩的X-Y坐标位置[16]。而电离原点的Z坐标则是通过测量次级电子从电离原点到探测器端盖上阳极丝的漂移时间并乘以平均漂移速度来求得。这样，将不断测量的电离原点的X-Y-Z坐标相连接便可以得到初级粒子的运动径迹。

1.2 STAR iTPC升级的物理动机及升级内容

1.2.1 STAR能量扫描计划

粒子物理学中的标准模型（Standard Model, SM）是一套描述组成微观世界构成的基本原理。该模型中截止到目前共包括62种基本粒子（包含引力子），同时描述了强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用，以及产生粒子质量的希格斯机制等。量子色动力学（Quantum ChromoDynamics, QCD）作为标准模型的一部分，它描述了强相互作用的规范原理，具体阐述了夸克和胶子之间的强相互作用，被认为是目前最为成熟的强相互作用基本理论。

夸克是一种构成物质的基本粒子，它主要参与强相互作用。夸克除了具有6种“味”（上夸克、下夸克、粲夸克、奇夸克、顶夸克、底夸克）的特性外，还具有3种“色”（红、绿、蓝）的特性。这里的色并不是我们日常中所看到的颜色，而是一种新引入的量子数的标识，即色荷。因此共有18种夸克，并且在这个基础上还有18种反夸克。夸克之间通过相互结合构成强子，比如质子和中子。由于“夸克禁闭”现象的存在，夸克不能被直接分离或者被观测到，所以只能通过对强子的研究来间接了解夸克的特性。早先的一些理论物理学家认

为，在宇宙大爆炸初期，物质的温度和密度都足够高，“夸克禁闭”现象有可能处于“开放”状态，此时的夸克可以在一个较大的范围内自由运动。这种新的物质状态被称作夸克胶子等离子体（Quark-Gluon Plasma, QGP）[17, 18, 19]。RHIC是当前世界上最大的高能物理大科学装置之一，其中的STAR合作组其主要科学研究目的便是探寻宇宙大爆炸初期可能存在的物质状态，即夸克胶子等离子体以及在高温、高密环境下的物质相变动力学。自运行以来已经获得多方面的证据来作为夸克胶子等离子体存在的证明。

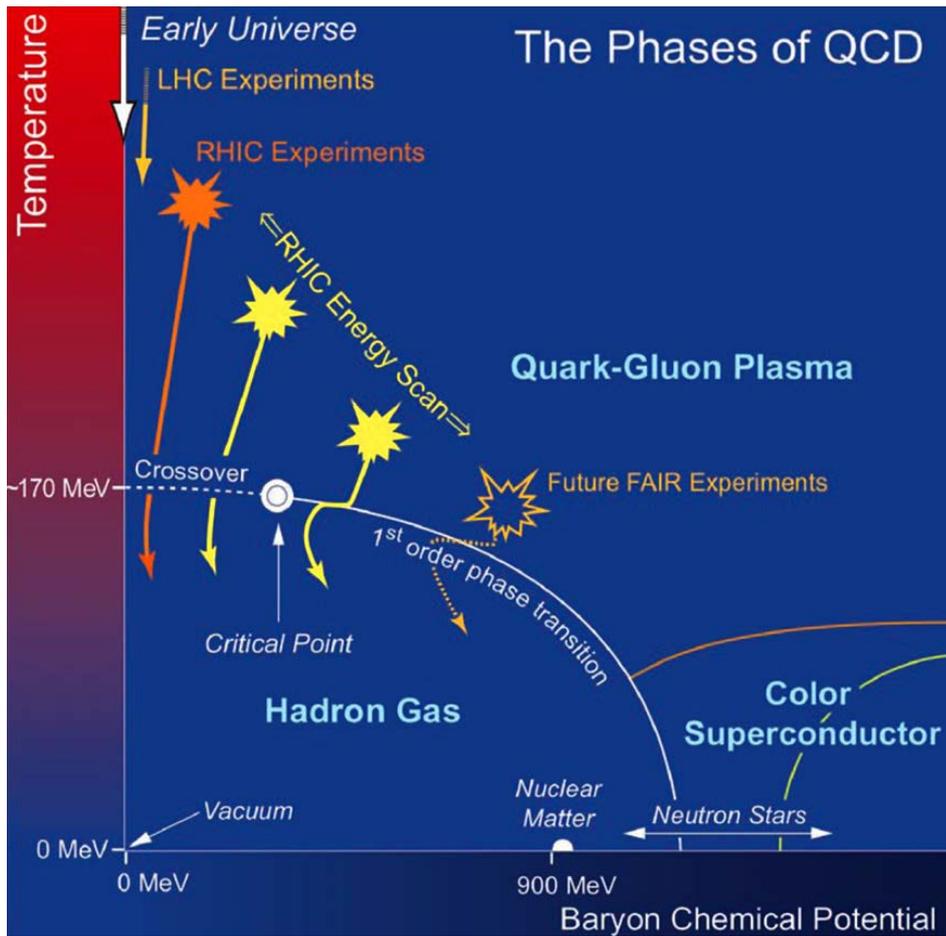


图 1.4: QCD相变过程示意图[20]

图 1.4为QCD相变的示意图。其中横轴为重子化学势，纵轴为温度，两者都受对撞能量的影响。在 高能区间，已经有大量实验证明物质主要发生crossover相变。而在低能区间，目前STAR还在通过大量的实验来探寻物质发生一阶相变的证据。而在两者之间是否存在一个相变临界点（Critical Point, CP），目前还没有找到直接证据。在更高温度、更高化学势下物质则处于夸克胶子等离子体状态。

当两个重离子对撞时，其内部的夸克和胶子发生剧烈的相互作用，最终可以得到一定温度和一定重子化学势的物质。通过不断调整RHIC的质心对撞能量，最终可以对不同状态下的物质进行扫描。以上成为寻找QCD相变理论存在证据的主要实验手段。基于以上原理，RHIC自2009年开始了一项能量扫描计划（Beam Energy Scan, BES），其中Phase-I[21]为质心能量分别为39GeV、27GeV、19.6GeV、11.5GeV、7.7GeV下的Au+Au对撞，并于2014年完成。期间虽然获得了一些证据来支持QCD相变理论，但是仍然有很多谜团有待解开。为此，RHIC计划在2019-2020年开展能量扫描计划Phase-II。二期能量扫描计划要求更高的数据统计量（相比较一期提升20倍），并计划在较低的能量段19.6GeV、14.5GeV、11.5GeV、9.1GeV、7.7GeV下进行扫描。RHIC计划在二期能量扫描中采用更长的对撞束流，再加上目前正在开发中的电子冷却技术，预计在7.7GeV附近对撞机亮度将会提升大约3倍，在11.5GeV及以上时将会提升大约8倍。

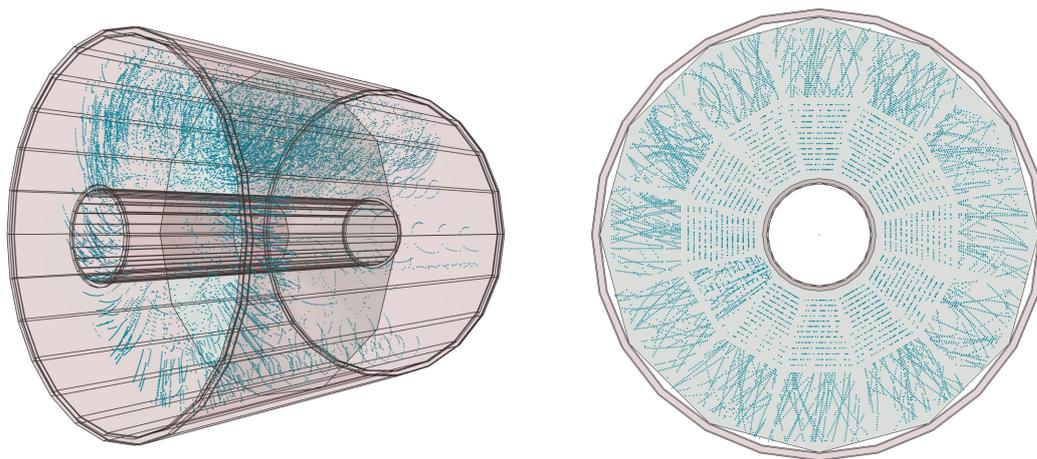


图 1.5: STAR TPC对于带电粒子径迹的重建

STAR探测器端盖部分分为内扇区和外扇区，对于低横动量粒子的鉴别主要依靠内扇区高速度区间的iTPC。而与外扇区探测器100%的pad覆盖率相比，升级前其内层扇区探测器的pad覆盖率仅有大约20%，pad的行间距大约为50mm，如图 1.5 所示，这样的pad覆盖率严重限制了探测器对于高速度区间低横动量事例的重建精度，无法满足能量扫描计划Phase-II对探测器的性能要求。基于此，探测器需要进行升级，升级后希望能在整体上提升TPC的粒子鉴别能力（即 dE/dx 分辨率）和探测能力，及提高TPC对于低横动量粒子的重建

精度并拓宽TPC在高快度区间的接收能力。

1.2.2 iTPC升级内容

为了达到能量扫描计划二期所预期的各项物理要求，STAR国际合作组计划对整个探测器进行升级[22]。而iTPC升级项目作为此次STAR探测器升级的重要组成部分，计划对探测器端盖两侧总共24个内扇区多丝正比室进行更换升级，撤换掉所有老化的丝面并对padplane进行重新设计。与升级前相比，其主要变化为：（1）iTPC的pad尺寸从 $3.35 \times 12 \text{mm}^2$ 重新设计为 $5.5 \times 11.5 \text{mm}^2$ ；（2）pad覆盖的行数由之前的13行提升至40行；（3）阳极丝工作电压由1170V降至1120V，阳极丝增益由3700左右降低至2500左右。

在iTPC升级前，STAR合作组使用STAR仿真模拟对iTPC升级方案进行了详细评估，其目的是为了研究iTPC升级将会带来的探测器物理性能上的变化，并证明其合理性。在整个模拟过程中，使用HIJING Monte Carlo事例发生器来产生 $\sqrt{S_{NN}}=200 \text{GeV}$ 能量下的Au+Au碰撞事例，然后将模拟数据传递给GEANT仿真包以进行对探测器的模拟，最后通过STAR TPC响应模拟(TpcRS)算法来得出最终的模拟结果。模拟结果显示，iTPC升级后对 π 介子、K介子及质子的重建效率得到明显提升，同时拓宽了探测器在高快度区间的接收度。在相同横动量的条件下，在低快度区间 ($|\eta| < 1$) 其重建效率略有提升，而在高快度区间 ($1 < |\eta| < 1.5$) 则有大幅度提升。

dE/dx 分辨率可以通过以下形式的函数粗略描述： $(\sqrt{N_{dE/dx}})^{-1}$ ，其中的参量 $N_{dE/dx}$ 是用于计算 dE/dx 的探测径迹采样点数。所以 dE/dx 分辨率的大小仅仅取决于粒子重建径迹的长度。iTPC升级后探测器由于在高快度区间pad数目的显著增加导致在相同的 dE/dx 分辨率下，其要求的重建径迹长度显著下降。而且相比于 $|\eta| < 1$ 的区间，在 $|\eta| > 1$ 的区间其 dE/dx 提升幅度更加的明显。而且由于 dE/dx 分辨率的提升，探测器可以更好的识别 π 介子、K介子及质子。

1.3 小结

本章首先对粒子物理发展史进行了简要概括，然后逐步介绍了高能物理的发展现状及未来前景，并最终RHIC-STAR实验为基础，引入本文前三章的工作课题：STAR iTPC升级。其中具体陈述了STAR iTPC升级的物理目的、升级原因、升级内容、升级后的性能预测。再接下来的章节中将分别从硬件系统搭建、探测器批量制作、探测器批量性能测试等阶段对作者所参与的iTPC升级项目进行展开介绍。

第二章 iTPC多丝正比室的批量研制

在整个iTPC探测器中，三层丝为最核心的组件。阳极丝对电子进行雪崩放大，阴极丝提供漂移电场，门极丝则利用开关门功能来阻挡阳离子回流。总的来说探测器的主要功能都是围绕三层丝来展开的。图 2.1展示了iTPC中三层丝的具体结构。

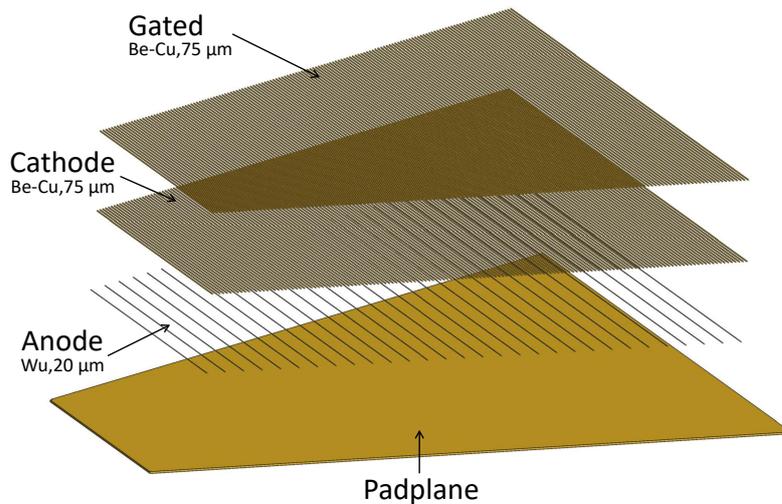


图 2.1: iTPC探测器中阳极丝、阴极丝、门极丝及padplane的结构示意图

其中阳极丝使用的是 $20\mu\text{m}$ 的镀金钨丝，其张力需要达到 $51\pm 3\text{g}$ ，间距需要达到 $4\pm 0.1\text{mm}$ 。阴极丝及门极丝使用的是 $75\mu\text{m}$ 的铍铜丝，其张力需要达到 $122\pm 6\text{g}$ ，间距需要达到 $1\pm 0.1\text{mm}$ 。要达到如此高的物理精度要求，为此特别设计了一套绕丝系统来实现绕丝的高精度及自动化要求。其中每个探测器总共需要164根阳极丝，每次在丝框上绕制180根，以及681根阴极丝及门极丝，每次在丝框上绕制700根。当绕丝过程结束后需要对丝框上的丝进行张力检测，达到性能要求后才能把三层丝分别落在iTPC挂载上。完成落丝过程后当然还要检测丝在探测器上的最终张力。如此大批量的张力测试靠手动测试不仅精度上难以保证，而且工作效率十分低下。为此，一套丝张力测试系统便应时而生。该系统通过自动化的激光扫描来实现张力的无人值守测试（不仅可以扫描测试张力，用同样的原理也可以扫描测试间距）。而对于丝间距的控制，一套丝梳装置可以进一步提高丝间距精度。通过上述所搭建的硬件设备系统，每个iTPC探测器的三层丝都会经过严格的制作流程以确保其达到预计的物理性能要求，最后方能进入性能测试阶段。

2.1 与iTPC研制相关的硬件系统搭建

2.1.1 绕丝系统

绕丝系统的机械部分由ATLAS sTGC项目国际合作组中的以色列团队提供，但是旧系统是基于dos的控制体系，由于年代久远且技术相对落后，无法达到如今的物理精度要求，所以在各个方面尤其是软件控制部分对绕丝系统进行了全方位的升级。其机械部分主要由绕丝面板、绕丝电机、齿轮组及驱动链条、角度编码器、张力传感器、滑轮组、张力电机、步进电机、丝杠、紧急停止开关等部件组成。图 2.2展示了绕丝系统机械部分的全景图。丝轴及丝框会根据需要随时进行安装或者卸载。

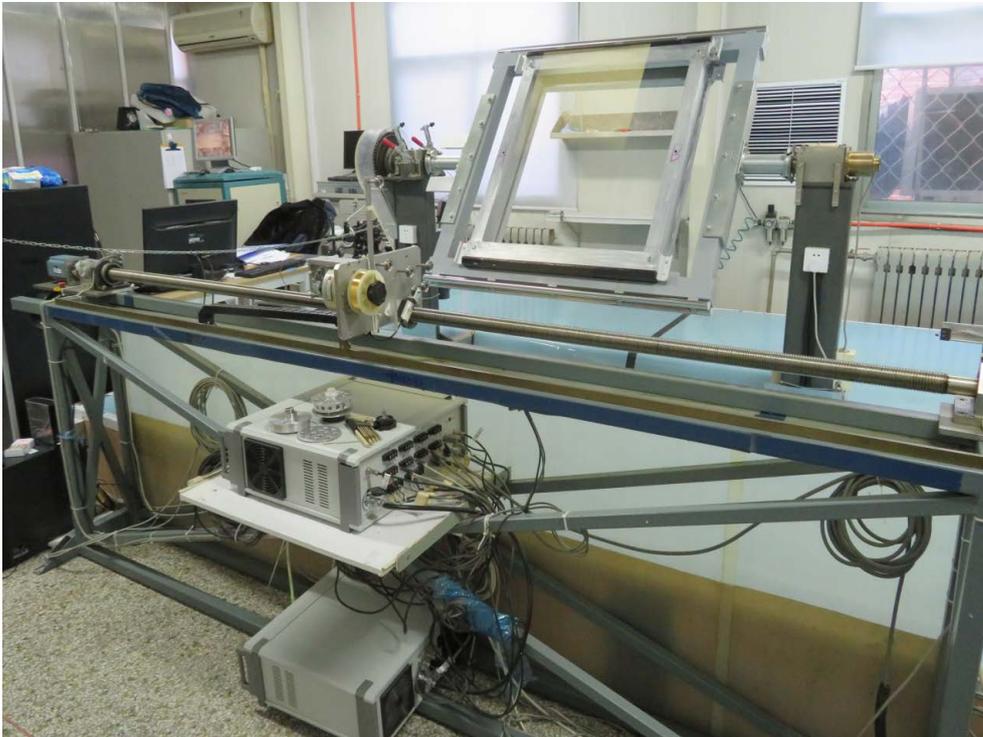


图 2.2: 位于山东大学高能物理实验室的绕丝系统全景图

除了机械部分外，当然还需要一套控制系统来驱动机械硬件来使它有条不紊的进行工作。其驱动核心主要围绕两部分：丝张力的控制及丝间距的控制。对于丝张力的控制主要由张力传感器、张力电机、绕丝面板来互相协作完成。丝间距则由步进电机通过绕丝电机及角度编码器的反馈信息来达到精确控制。以上交互功能中所有的数据采集及数据传输反馈都是基于一套NI-DAQ数据采集系统来实现[23, 24]。计算机控制终端通过LabVIEW软件程序来对整个硬件进行全方位的控制[25]。

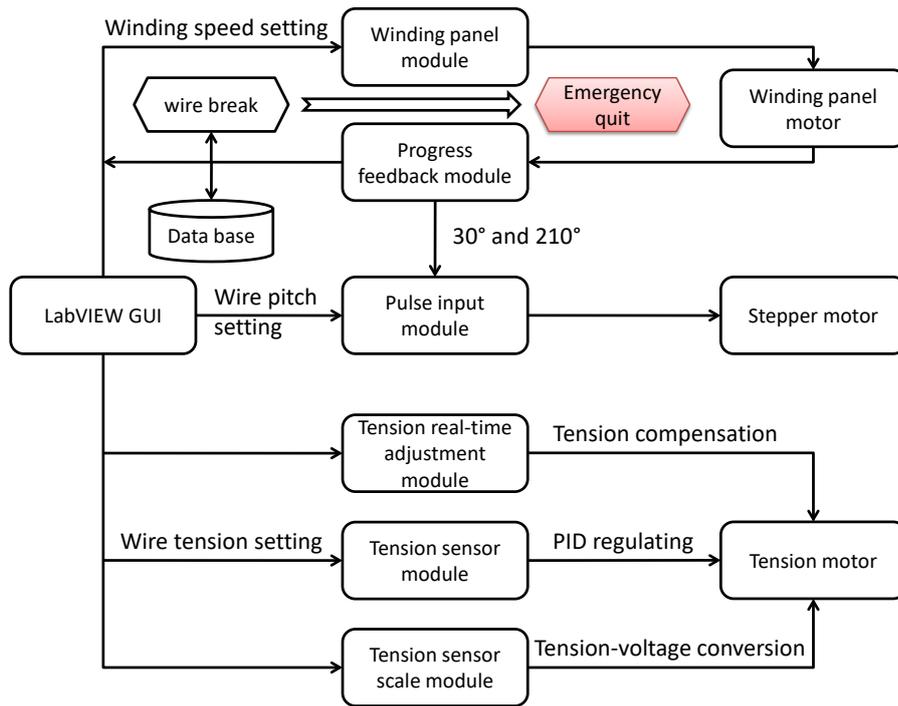


图 2.3: 绕丝系统数据传输框架

图 2.3展示了整个绕丝系统从表层LabVIEW GUI到中层LabVIEW各控制模块再到底层机械部分的数据信息传输框架。通过LabVIEW编写的GUI对整个系统下达工作指令，GUI的后台程序被细分为负责各项功能的模块[26, 27]。绕丝面板控制模块控制机械部分的绕丝面板，可以在GUI中通过设定绕丝面板电压来控制其转速，这个电压值通常设置为1.5V（绕丝速度过慢或者过快都容易导致断丝，在1.5V下绕丝机可以保持最佳的平稳状态）。脉冲输入模块则控制步进电机的启停及步距，当步进电机脉冲输入模块接收到信息反馈模块的角度反馈信息时，使其在固定的角度实现启停。步距同样可以在GUI中设置（每次步进距离为所设定丝间距的一半）。对于张力的精确控制则由张力传感器刻度模块、张力传感器PID控制模块[28]、张力实时调节模块共同完成。通过数据信息反馈模块可以把绕丝过程中的信息实时反馈到GUI和数据库来帮助监控整个绕丝过程。如果在绕丝过程中出现断丝现象，信息反馈模块会把断丝警告传输至紧急启停开关来关闭整个绕丝系统。之后可以查看日志进行故障排除并重新开始绕丝。

2.1.2 丝张力测试系统

丝张力测试系统的激光平台由STAR iTPC项目合作组美国BNL实验室提

供，但旧的硬件平台只能通过手动来测试丝张力，之前每个探测器只是抽取一定数量的样本进行张力检测，并不是每一根都会测量。在原有硬件基础上进行升级改造后，实现了自动化扫描，无需人力操作即可完成对所有丝的张力测试[29]。

由绕丝系统精确的提供丝张力后，下一步要对丝框上每一根丝进行严格的张力测试，它对探测器增益的均匀性至关重要，在保证丝张力达到精度要求后方能落丝。对于丝张力测试原理，都离不开丝的震动（提取基频）。所以如何让丝更简洁方便的振动，是此次改进的重点。在过去已经开发出的测试方法中，使用磁场或通过电容耦合来使丝线震动的方法使用的较多，但是它的缺点是需要人力手动连接导线，这样便达不到自动化的要求[30, 31]。经过尝试，使用压缩气体通过喷射的方式使丝产生振动，每喷射完一根丝后激光平台及系统会自动提取其基频并由LabVIEW计算模块推导出该根丝的张力，然后导轨自动平移动到下一根丝重复上述过程从而完成自动化测试。单次张力测试的物理原理如式 2.1所示：

$$T = 4\mu f_0^2 l^2 \quad (2.1)$$

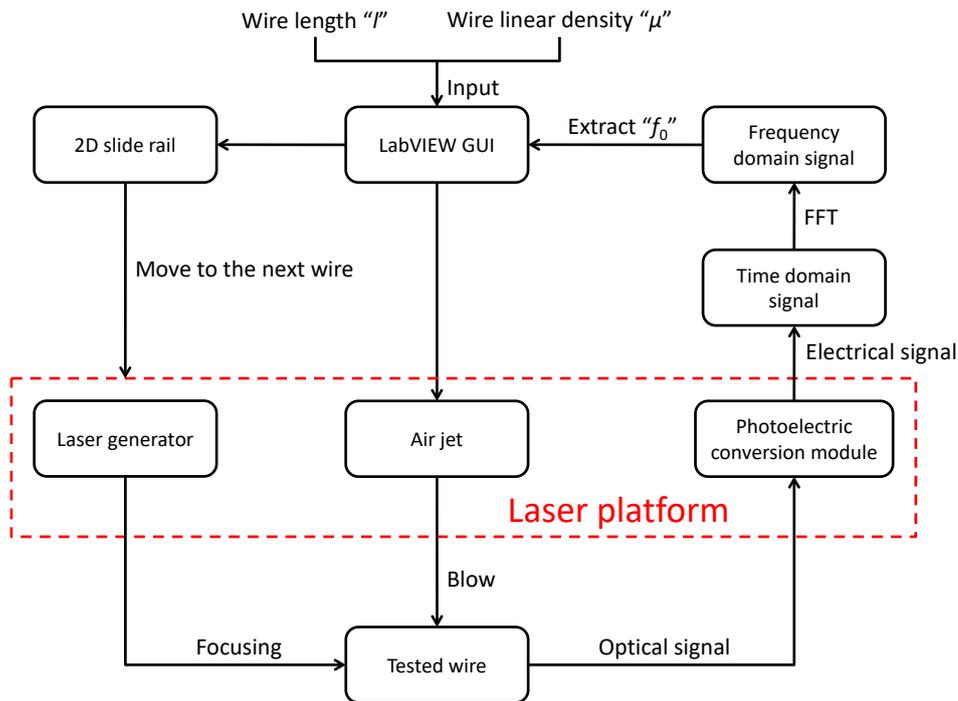


图 2.4: 基于二极管激光平台的丝张力测试系统原理图

其中 T 为丝张力， f_0 为丝振动的基频， μ 为线密度， l 是丝两个固定端之间的长度（通常为丝在丝框上两个粘贴点的距离）。 μ 和 l 为已知，所以计算张力的

关键点还在于基频 f_0 。图 2.4展示了整个张力测试系统的工作流程。丝在空气喷射的作用下振动。当空气喷射器停止吹气时，丝会自由振动，其振动的基本频率 f_0 正比于丝的张力。丝被激光束照射，反射光由光电二极管收集，光电二极管可将光信号转换为电信号。丝的机械振动频率等于反射激光的强度波动频率。最后，原始模拟信号经过系统采样后转化为数字信号并进行记录[32]。数字化信号是时域数据，并且可以通过快速傅立叶变换（FFT）算法将它们变换到频域[33]，并最终从频域信号中提取到基频 f_0 。

除了激光平台和气体喷射器，硬件部分还包括步进电机。激光平台和空气喷射器都安装在步进电机平台上，并可随平台自动移动。将丝框放置在支撑架上，该支撑架与步进电机的移动方向绝对平行。因此，激光束可以逐个扫描框架上的丝，并获得每根丝的张力。当测量开始时，激光束聚焦在待检测的丝上。为了获得足够强度的反射图像，聚焦在丝上的激光光斑必须与丝的直径大致相同。空气射流由气泵驱动，可以调节空气射流的持续时间及强度来获取合适的丝振动。

张力测试系统的软件部分同绕丝系统一样，都是在Windows平台上使用LabVIEW图形化编程开发而来的。运动控制卡（DMC2410）和数据采集PCI卡（NI-6230：16位，250kS/s）通过RS-232串口与计算机终端相连接。运动控制卡负责步进电机的驱动和控制。串口用于使用Modbus协议与智能开关模块（MR-D0808-KN）通信，该协议用于激活继电器，即负责打开或关闭空气喷射。数据分析通过FFT算法完成。而且可以根据实际测试情况输入相应的参数，例如丝长，线密度等，并且张力的实时测试情况都会在界面的图像区显示。通过Apache和PHP构建的远程操控网络可以使用户在互联网上获取实时测试结果。

2.2 丝框的张力及间距检测

2.2.1 丝张力及丝间距扫描测试

对于丝张力测试系统的测量误差，丝震动基频 f_0 （误差 $\pm 0.1\text{Hz}$ ）、丝长 l （误差 $\pm 1\text{mm}$ ）、线密度 λ （误差 0.5mg/m ）会贡献一部分（丝在震动过程中阻尼效应对张力测量影响极小，可以忽略）。测试过程中的系统误差也会贡献一部分。将所有误差来源合为一个整体来看，通过对丝张力测量真实值与标准设定值的线性度及重复测量下的稳定度两项内容的评估来得出系统的测量精度。首先将一根直径 $20\mu\text{m}$ 的镀金钨丝和一根直径 $75\mu\text{m}$ 的铍铜丝的一端分别焊接在丝框的顶端，另一端用标准重量的砝码拉伸，不断增加砝码重量并且每次测量记录下测量真实值与标准设定值（根据砝码重量算出）。经过整合所有

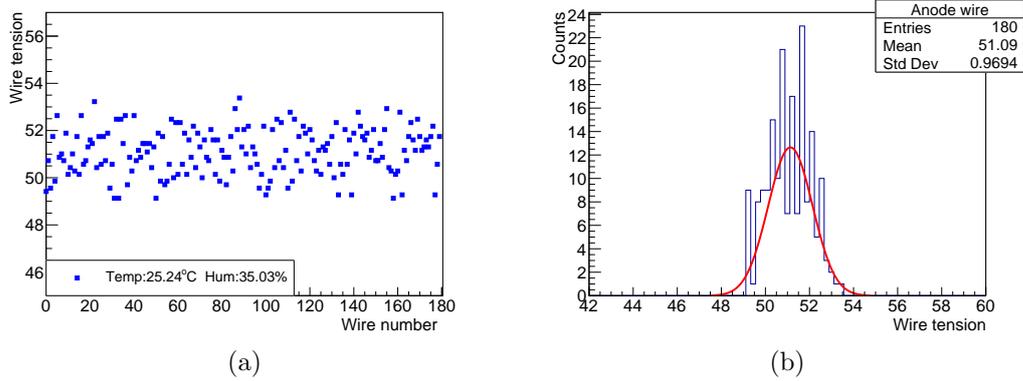


图 2.5: 丝框180根阳极丝张力扫描测试范例 (a)阳极丝丝张力扫描数据; (b)丝张力扫描数据分布

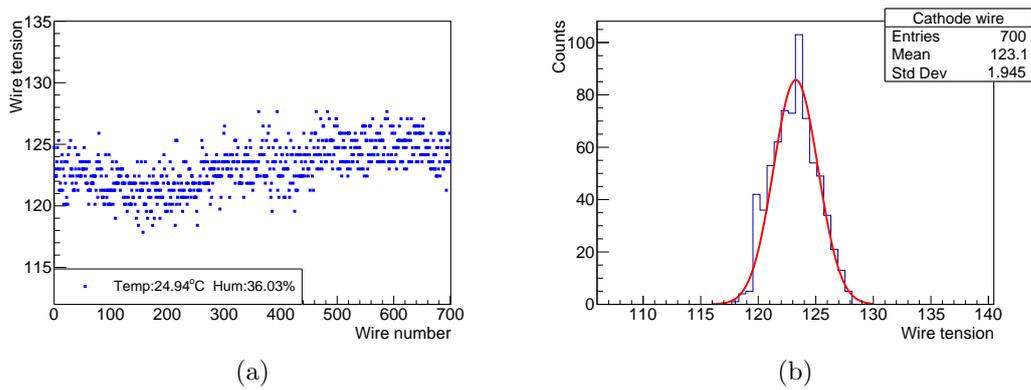


图 2.6: 丝框700根阴极丝张力扫描测试范例 (a)阴极丝丝张力扫描数据; (b)丝张力扫描数据分布

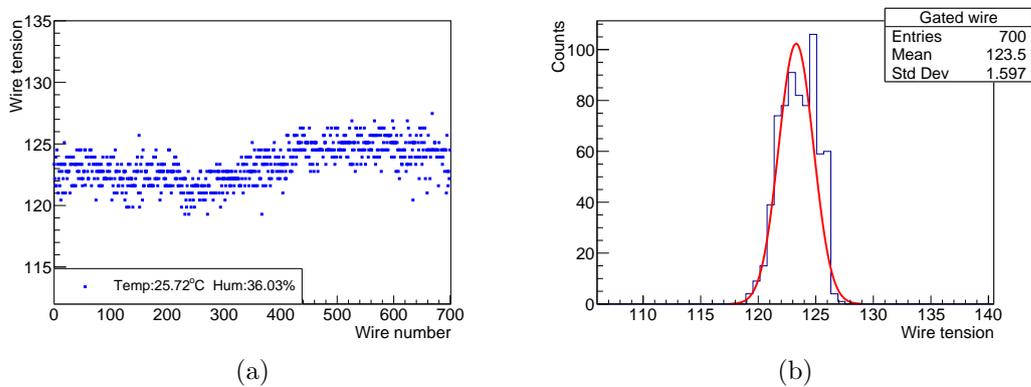


图 2.7: 丝框700根门极丝张力扫描测试范例 (a)门极丝丝张力扫描数据; (b)丝张力扫描数据分布

数据进行对比后发现，直径分别为 $20\mu\text{m}$ 和 $75\mu\text{m}$ 的丝其测量真实值的基频 f_0 与标准设定值呈现出良好的线性关系，其中每个点均测量100次，使用RMS作为误差 ($<0.8\%$)。对于直径 $20\mu\text{m}$ 的阳极丝，在10g到60g的范围内其具有良好的线性。对于直径 $75\mu\text{m}$ 的阴/门极丝，在100g到350g的范围同样具有良好的线性。这个范围已经能远远覆盖iTPC升级中所用到的张力大小（阳极丝要求达到51g，阴/门极丝要求达到122g）。

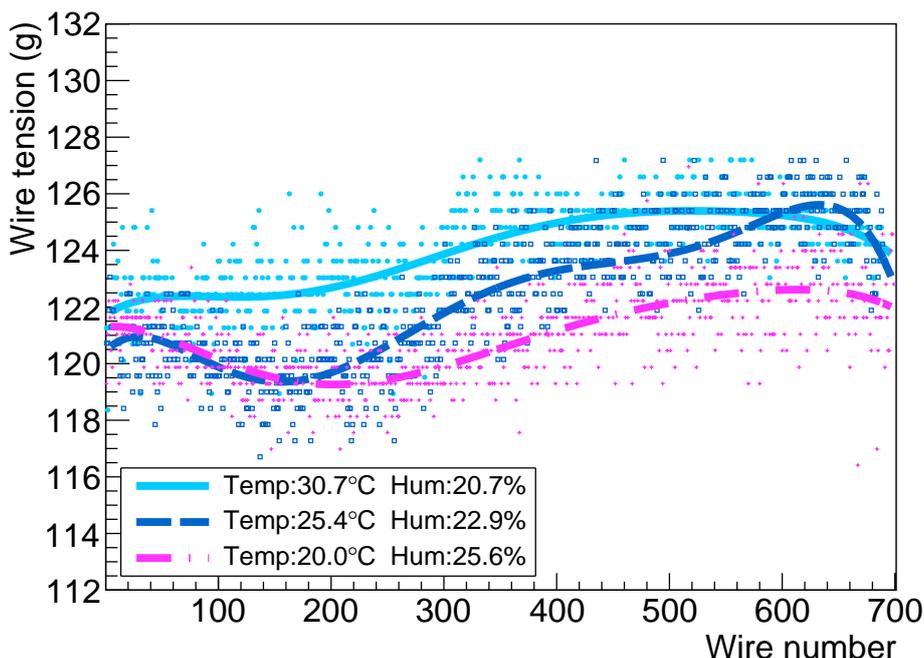


图 2.8: 丝框上阴/门极丝在三种不同温度情况下的张力测试情况

为了验证丝张力测试系统的稳定性，将直径 $20\mu\text{m}$ 的镀金钨丝和直径 $75\mu\text{m}$ 的铍铜丝分别悬挂砝码50g和120g，然后分别测量张力100次。对于直径 $20\mu\text{m}$ 的镀金钨丝，张力的实际测量Mean值为50.15g，与标准设定值（50g砝码）相差0.15g，这个误差绝大部分传递自丝震动基频 f_0 、丝长 l 、线密度 λ 的误差，其稳定性达到0.52%（RMS/Mean）。而直径 $75\mu\text{m}$ 的铍铜丝其实际测量Mean值正好达到了标准标准设定值（120g砝码），稳定性达到0.33%。所以该系统无论是测试精度还是稳定度都达到了一个较高的水准。

经过上述对丝张力测试系统的精度及稳定度的验证后，下面开始对整个丝框进行丝张力自动化扫描测试。图 2.5展示了阳极丝张力测量范例，阳极丝丝框每次绕制180根，整个扫描测试耗时3小时左右，Mean值达到51.09g，且全部丝张力均在所要求的 $51\pm 3\text{g}$ 的精度范围以内。而阴/门极丝丝框每次绕

制700根（经过张力补偿），如图 2.6和图 2.7所示，在范例中，Mean值分别达到了123.1g和123.5g，丝张力均在所要求的 $122\pm 6g$ 的精度范围以内。在往iTPC挂载上落丝之前，三层丝在丝框上的张力全部达到了精度要求，同时实现了自动化的批量扫描测试。

为了排除温度对张力的影响，3个不同的时间段内分别将同一个阴/门极丝丝框的张力测试3次。温度变化从 20.0°C 变化至 30.7°C （湿度从20.7%变化至25.6%）。如图 2.8 所示，用6阶多项式分别拟合三次测量数据得到三条拟合曲线，大约每升高 10°C 张力有平均0.4g左右的升高，温度上升 10°C 左右张力仅变化4g，这个变化尚处于可允许的 $\pm 6g$ 范围之内，所以温度虽然对丝框张力的变化有影响，但是影响不大，而且实验室对于室内温度的控制非常严格，常年保持在 25°C 左右。

丝张力测试系统不仅可以自动扫描张力，而且还可以扫描丝间距。它的测量原理同样是利用激光的模拟信号实时反馈来实现的。激光平台在导轨的带动下以均匀的速度扫描丝框上的丝。当激光正好对准一根丝时，反射光强最大，其激光反馈信号幅值达到最大。随着激光的移动，光斑逐渐偏离丝，这时反馈信号的幅值会慢慢衰减，直到光斑完全脱离丝后，反馈信号的幅值变为0V。在整个扫描过程中，每个峰的峰位被视作丝的位置，扫描结束后提取所有峰位进行数据分析便会得到所有丝的丝间距测试结果。

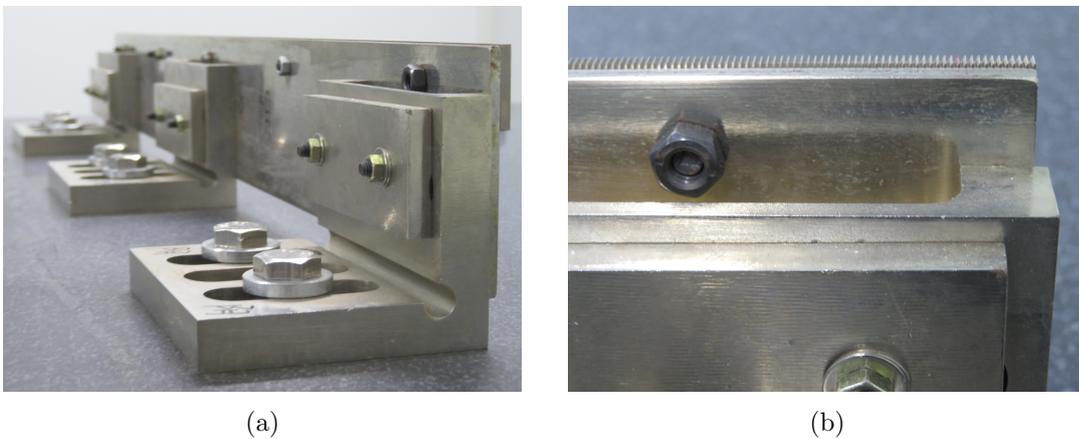


图 2.9: (a)安装在大理石平台上的丝梳实物图。丝梳主要由两部分组成：锯齿梳和直尺。直尺位于锯齿梳的后面，竖直位置则位于锯齿高度的一半处。通过将导线推入直尺与梳子垂直交叉点来对齐丝；(b)锯齿梳及直尺的局部放大图

丝间距会直接影响到iTPC的径迹重建精度，所以丝间距的误差需要控制在 $10\mu\text{m}$ 以内。当丝还处在粘贴在丝框上的时候，其丝间距的精度完全取决于绕丝系统。步进电机的精度及丝框上下两端落丝面的摩擦力都会影响到丝间距，所以仅靠绕制环节来控制丝间距的精度是不够的。往iTPC丝挂载上落丝时高精

度丝梳可以帮助落丝时更进一步的提高丝间距精度[34]，丝梳实物图如图 2.9所示。丝梳加工齿距为1mm，精度小于 $10\mu\text{m}$ 。首先将丝落在丝梳后面固定的钢尺之上，这样所有丝的高度便达到了统一高度。然后将丝滑入每一个钢尺的直角顶点，这样丝间距便等同于丝梳锯齿的加工间距。通过对丝框微小的平移，将所有丝都滑入丝梳锯齿的直角顶点，最后用显微镜观测进行复查。

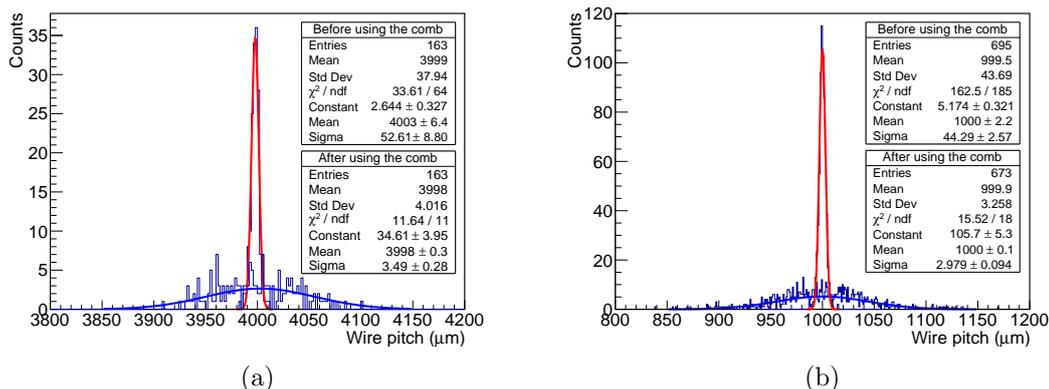


图 2.10: (a)阳极丝使用丝梳前后丝间距精度对比；(b)阴/门极丝使用丝梳前后丝间距精度对比

经过绕丝系统绕制后会进行第一遍张力及间距的测试，丝框上的丝经丝梳的梳理后落到iTPC挂载上后会进行第二遍张力及间距的测试。如图 2.10所示，阳极丝在丝框上时其丝间距的精度仅有 $52.61\mu\text{m}$ ，经过丝梳梳理后最终落到挂载上的丝间距精度达到了 $3.49\mu\text{m}$ 。而阴/门极丝按照上述步骤操作最终也达到了 $2.98\mu\text{m}$ ，这远远超过了所要达到的 $<10\mu\text{m}$ 的精度范围。

2.2.2 丝框受力变形分析及张力补偿

以绕制阴极丝和门极丝为例（阳极丝需求张力为51g，且丝框上仅需要绕制180根，丝框受力较小变形可以忽略），每一根丝的张力需求为122g，约为1.2N。每次需要在丝框上绕制700根，所以整个丝框承受的力为840N，即便是牢固的铝制丝框，在这个力的作用下也会产生明显形变。因为制作工艺的缘故，丝框中间部位在这个力的作用下会导致变形向内凹陷并使丝框中间的张力有一个跌落，这样绕制出的丝框其张力是无法达到张力标准的。使用ANSYS模拟分析丝框的受力情况可以更好的量化这一形变过程。如图 2.11所示，所使用的丝框尺寸为 $60 \times 30 \times 883\text{mm}$ ，材质为厚3mm的铝型材，当加载上840N的拉力后，丝框的中间部位最大变形可以达到 $88.19\mu\text{m}$ 。图 2.13(a)展示了在没有张力补偿的情况下一对阴/门极丝丝框张力测试图。张力设定为122g，但是经过张力检测丝框两边的张力平均有5g左右的跌落，而中间部分有平均15g的跌落，这

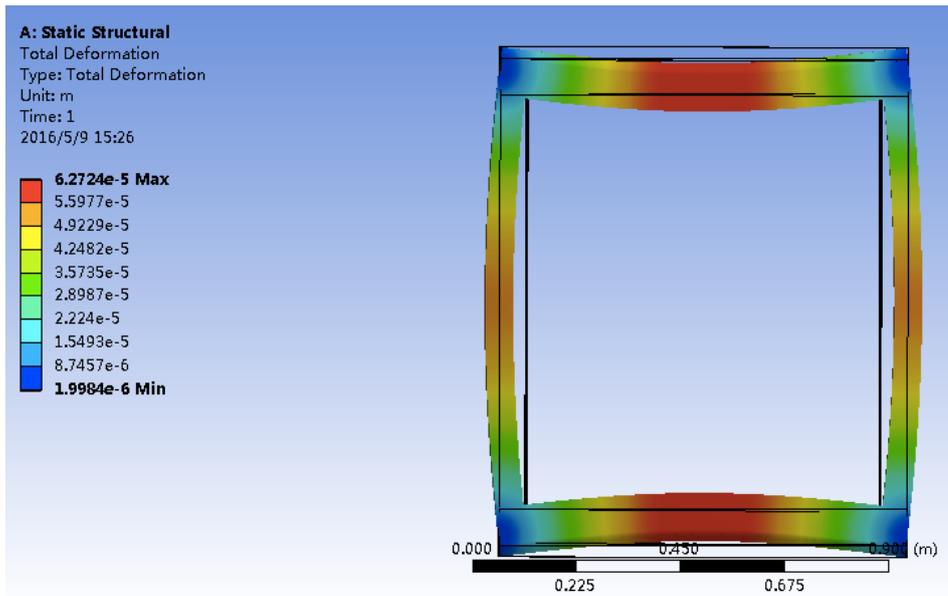


图 2.11: ANSYS模拟丝框受力变形情况

远远超出了所要求的最低精度范围 $122\text{g}\pm 6\text{g}$ ，所以不经过张力补偿的丝框无法达到使用要求。



图 2.12: LabVIEW张力实时调节模块

为了解决丝框变形张力下跌的问题，在LabVIEW中添加张力实时调节模块，绕丝时每根丝的张力不再是固定的输入值，而是实时变化的，张力的整个补偿曲线设置为向上的拱形，中间部分下跌的多那么相应的就补偿更多的张力，最后剪断丝框上粘贴牢固的丝后，丝张紧的一瞬间张力会瞬间落入 $122\text{g}\pm 6\text{g}$ 的范围。图 2.12展示了LabVIEW张力实时变化模块，在此模块中输入张力补偿曲线，绕丝时每根丝的张力便会按照此曲线实时变化。

经过LabVIEW张力补偿模块实时调节张力后，再一次检测阴/门丝丝框张力。这一次丝框上所有张力值并没有出现整体下跌的情况，如图 2.13(b)所示，所有张力值均落入 $122\pm 6\text{g}$ 的范围之内，经过上述硬件与软件的协同工作，整个绕丝系统最终可以有条不紊的按照特定的需求实现自动化绕丝，绕丝结束后丝

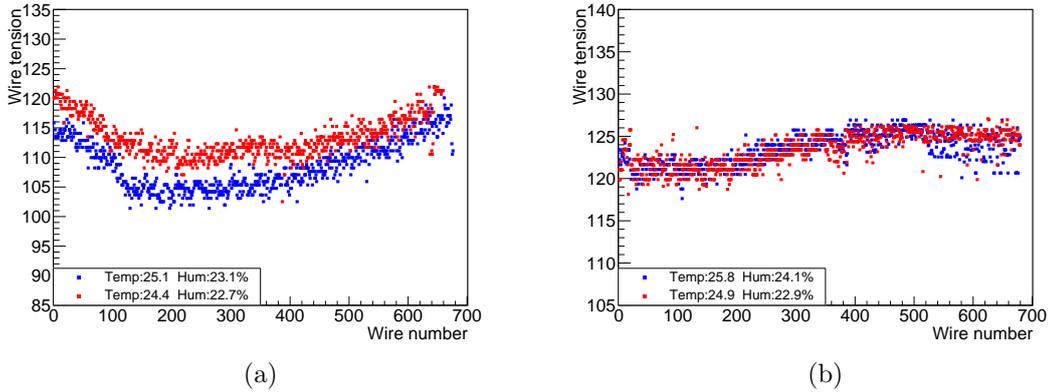


图 2.13: (a)张力补偿前1对阴/门极丝丝框张力测试图；(b)经过张力补偿后1对阴（门）极丝丝框张力测试图

张力测试系统分别对丝框上及落在探测器上的丝张力进行严格检测，这些都为后面iTPC的批量制作奠定了基础。

2.3 iTPC多丝正比室主要部件的设计

2.3.1 主体框架

iTPC多丝正比室的主要构件包括三层丝（上一节已经结合绕丝系统及丝张力测试系统对三层丝进行了详细介绍）、主体框架strongback、信号感应板padplane。根据此次iTPC的升级内容，探测器硬件部分包括主体框架strongback和信号感应板padplane全部都经过了重新设计。主体框架strongback是整个探测器的基体，承载着探测器的所有构件，通过特殊的螺栓定位可以密合在STAR TPC的端盖框架上。strongback必须具有足够的强度和刚度以承受各种载荷，所以在材料方面选用高强度合金铝作为基材，强度高且较为轻便[35]。综上，在设计过程中则着重考虑两个问题：第一，strongback必须能够承受由丝张力带来的自身应力和形变。第二，strongback的面部必须能够承受TPC内部压力的变化。

每一根阳极丝的丝张力为51g，164根阳极丝一共会带来拉力81.96N，每一根阴极丝和门极丝的丝张力为122g，681根阴极丝和681根门极丝各会带来拉力814.20N。如此大的拉力都负载在探测器两端的挂载上，挂载受到丝的拉力会向内弯曲产生形变从而带动strongback两侧一起形变。图 2.14显示了由阳极丝、阴极丝和门极丝张力而引起的strongback形变模拟。在该模拟中，总的载荷设置为 $81.96+814.20+814.20=1710.37\text{N}$ 。strongback背面信号读出板padplane的厚度为0.125英寸，中间还夹有0.100英寸的铝层。在对strongback的设计中最重要

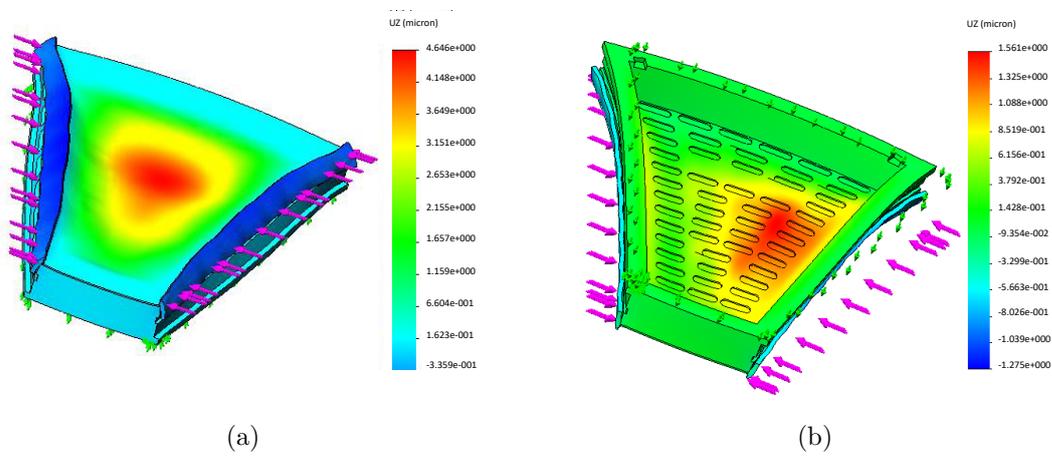


图 2.14: 由三层丝张力导致的strongback形变模拟 (a)有加强筋设计, 背面padplane最大形变为 $4.6\mu\text{m}$; (b)无加强筋设计, 背面padplane最大形变为 $1.6\mu\text{m}$

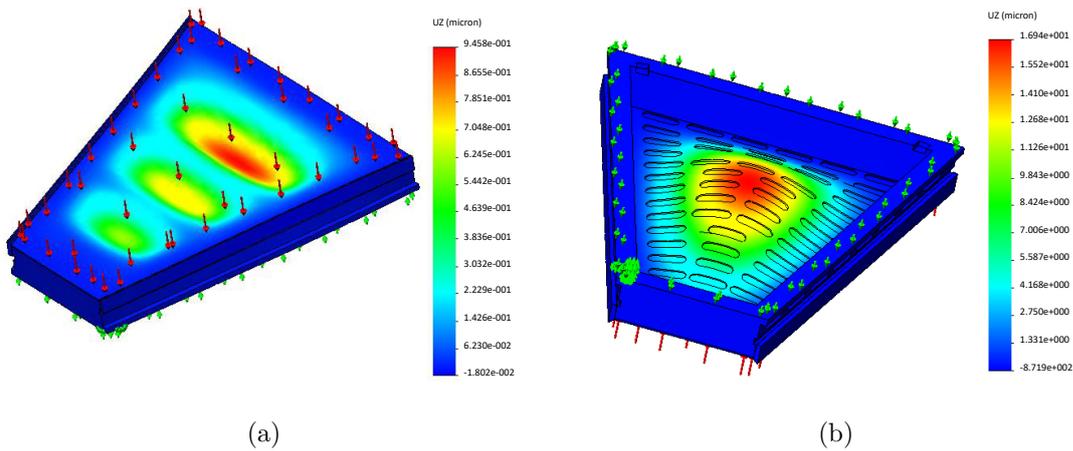


图 2.15: 由TPC内部气体压力导致的strongback形变模拟 (a)有加强筋设计, 背面padplane最大形变为 $9.5\mu\text{m}$; (b)无加强筋设计, 背面padplane最大形变为 $16.5\mu\text{m}$

的一点就是要使其形变在丝张力负载下尽可能小并保证其背部的padplane平整度好于 $10\mu\text{m}$ ，以确保探测器增益均匀性 $<1\%$ 。图 2.14(a)和图 2.14(b)分别显示了有加强筋和没有加强筋的strongback的形变情况。比较出乎意料的是，strongback在有加强筋的情况下其背面padplane的形变要大于没有加强筋的配置，这是因为加强筋会将力及形变传导到背面的padplane上。另外在图 2.14(b)中strongback左右两边的形变是不对称的，这是因为其右边缘设计有各种电子元件的孔插槽，而左边缘为实心。在两种情况下padplane的平整度均好于 $10\mu\text{m}$ ，所以strongback内加强筋的设计是不必要的。

图 2.15(a)和图 2.15(b)分别显示了有加强筋和没有加强筋的strongback在探测器内部气压保持在高于大气压2mbar的情况下的形变情况。在没有加强筋的情况下padplane的变形超过 $10\mu\text{m}$ ，padplane下0.100英寸的铝层太薄而不能承受TPC内部的高于大气压2mbar的气压冲击。所以从这个角度上讲，strongback内部的加强筋还是有用的，进一步的模拟表明适当控制加强筋高度并将其支撑在strongback两边的侧壁上会兼顾丝的拉力和探测器内部的气体压力带来的形变。

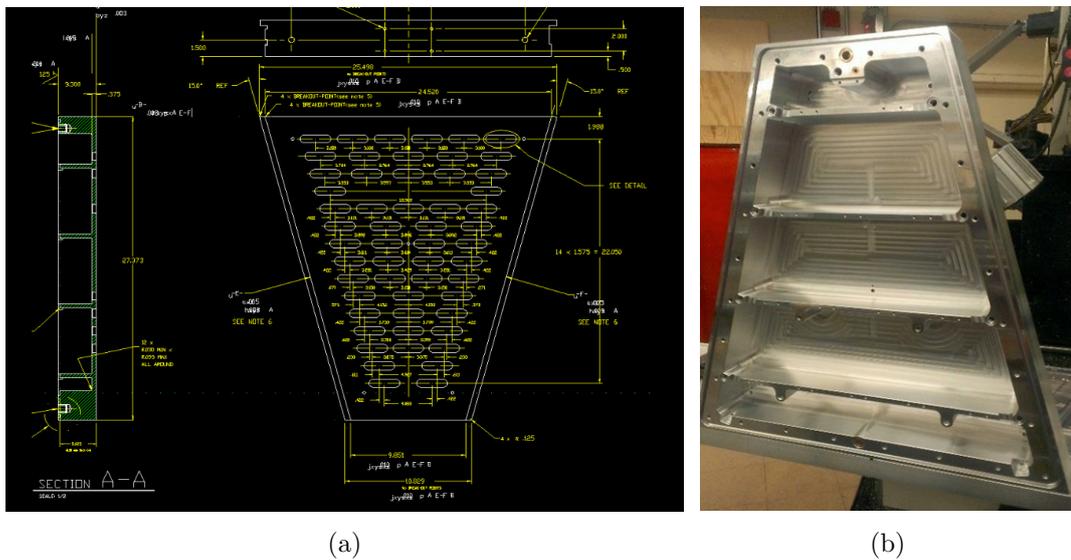


图 2.16: (a)strongback二维设计图；(b)strongback成品实物图

经过上述模拟，最终的strongback设计方案如图 2.16(a)所示。在实际制作过程中一块约27英寸高，25英寸宽的合金铝块经过数控加工中心的处理，成品（背面电子学插槽尚未完成）如图 2.16(b)所示。加强筋之间的空间会安插相应的电子学，高压线和相应的电子元件通过其侧壁的孔槽与挂载上的金属触点相连接。

2.3.2 信号感应板

电子进入探测器经雪崩放大后，在阳极丝上会产生一个负脉冲信号，并同时在其垂直位置下方的pad上感应出一个正脉冲信号。由于雪崩放电经常是区域性的，所以离阳极丝雪崩点越近的pad感应到的信号越大，其他pad上的信号随着与雪崩放电距离的增大而成比例递减。

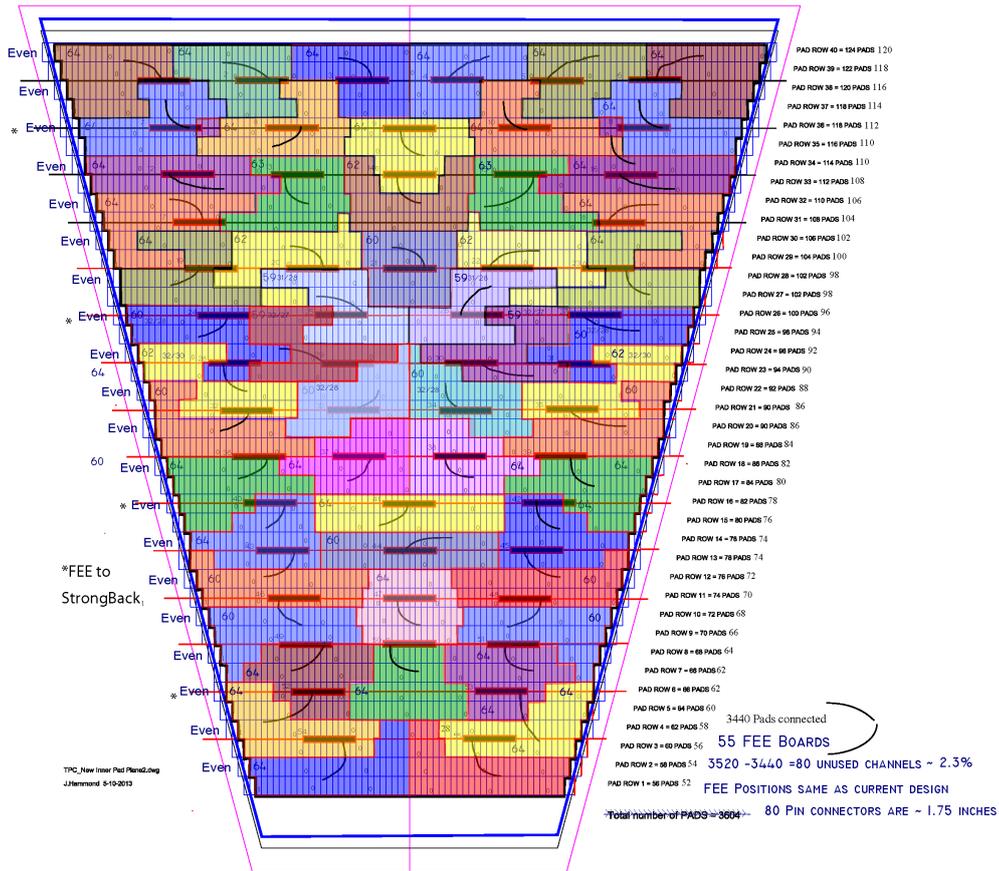


图 2.17: 升级后的padplane最上层板设计图

Padplane作为所有pad的载体，共包含4层板（复合结构）[36]。最下层板（紧贴strongback的一层）焊接有55个转换接头（80pin），每个转换接头都可以连接相应的前端电子学（Front End Electronic, FEE）对所管辖的pad进行读出。最上层板为pad平面，图 2.17显示了升级后padplane最上层板设计图。与旧设计相比，升级后的padplane发生了显著的变化：（1）pad的行数由13行变为40行。（2）pad的数目由1750个增加到3520个，在实际工作时会用到3440个。（3）pad的尺寸由 $11.5 \times 2.85 \text{mm}^2$ 变为 $15.5 \times 5.5 \text{mm}^2$ [37]。

最上层板与最下层板之间还夹有2层印刷电路来连接最上层板和最下层板，这样信号的传导路径尽可能短以获取良好的信噪比。4层板贴合好后需要对每一个pad通道进行连通性测试来保证每一个pad都可以正常工作。如图 2.18所示，padplane四层板加工完成，经过各项检测合格后最终贴合到strongback背部。

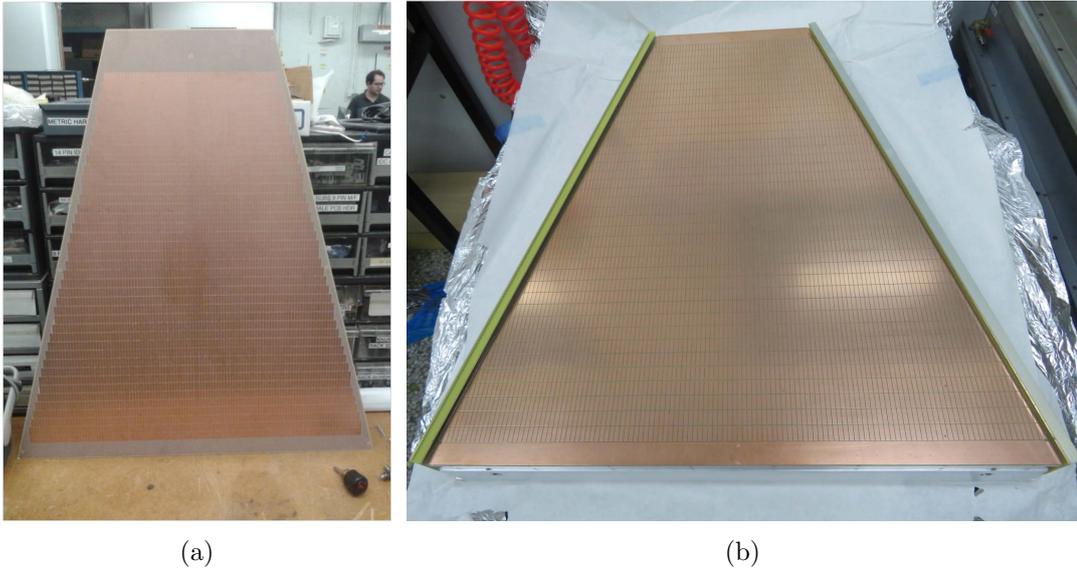


图 2.18: (a)padplane实物图；(b)padplane与strongback贴合后的实物图

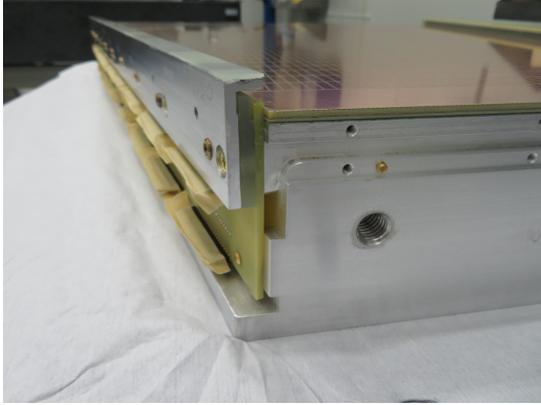
2.4 iTPC多丝正比室的批量制作

经过前面的工作，目前备用的成品有经张力检验合格的阳极丝、阴极丝、门极丝丝框，背部贴合信号感应板padplane且平整度达到要求的主体框架strongback，三层丝的挂载以及若干电子元器件。下一步的工作就是按照既定的流程将上述构件组装到一起，并遵循严格的质检，其中任何一步如果没有达到技术标准都会对下一步的制作步骤产生影响。

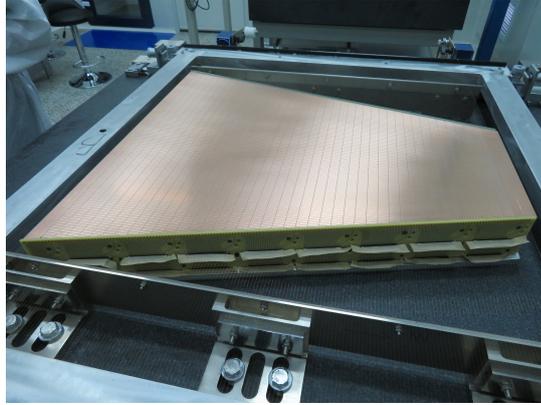
制作流程中的所有操作步骤均在超净室完成，任何碎屑等大颗粒如果落到探测器的阳极丝上都会在高电压测试时引起打火，所以对超净室的清洁程度有很高的要求。图 2.19为整个制作流程的现场图，具体制作步骤如下：

(1) 固定挂载。用固定扭矩的扭力扳手拧动螺栓将两根PCB材质的挂载牢牢固定在strongback的两侧，在此之前一定要保证每个贴合的平面是光滑无颗粒的，否则拧紧挂载后会因为颗粒的存在造成局部突起，在落丝后经丝张紧挂载会有一些的弯曲而造成局部丝张力下降。

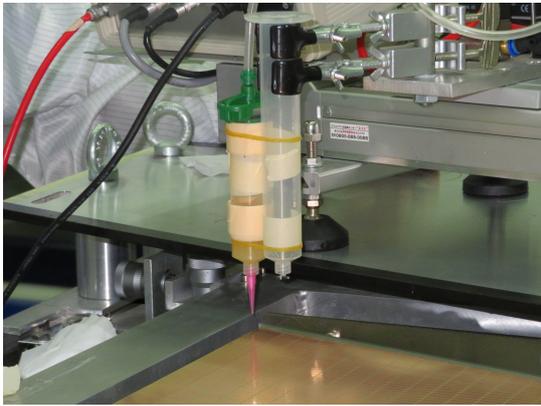
(2) 落丝。首先将strongback固定在丝梳之间的大理石平台上，通过两个



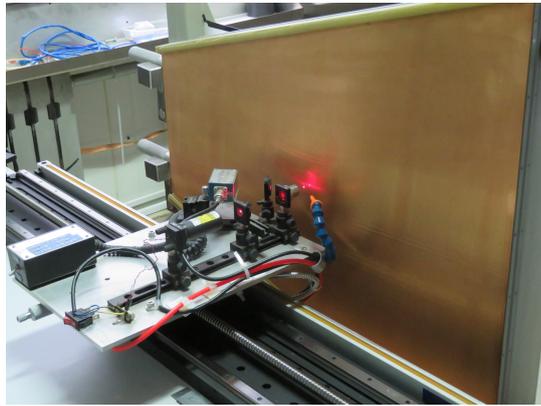
(a)



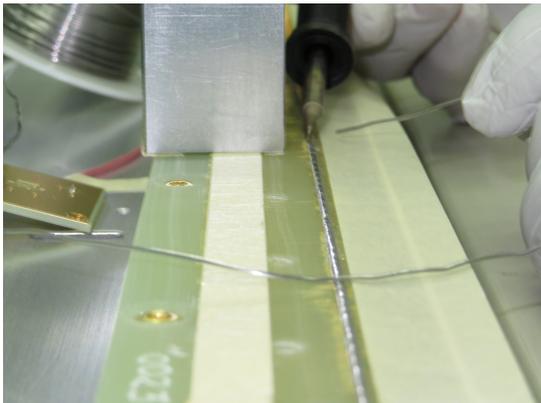
(b)



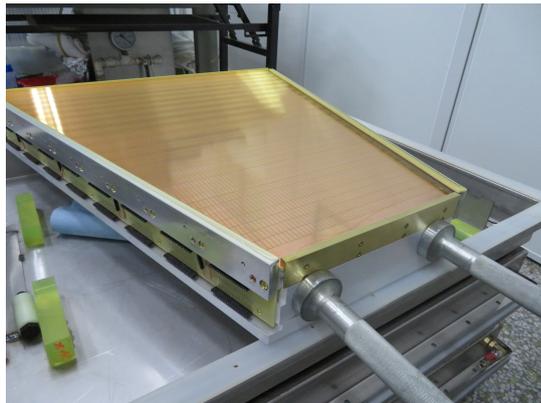
(c)



(d)



(e)



(f)

图 2.19: iTPC多丝正比室制作流程 (a)挂载安装; (b)落丝; (c)涂胶; (d)丝张力测试; (e)丝面焊接及连通性、短路测试; (f)制作完成

球型关节来精确控制strongback的位置。然后将绕好丝的丝框放置在丝梳四个角上的定位突起点上，通过千分尺装置不断调节丝框的高度和位置，保证每一根丝都落在丝梳钢齿内。对丝框的前后及上下位置稍作移动使每一根丝都被推动到锯齿梳和直尺的交叉点上。

(3) 涂胶（环氧树脂）。丝面位置固定好后，使用自动点胶机把丝面粘贴在两端的丝挂载上。自动点胶机可以控制步进的速度及通过控制气压大小来控制出胶量，使用要调整点胶机点胶头的位置保证其步进的行程正好在丝挂载的上方。

(4) 丝张力及间距测试。环氧树脂需要静置48小时才能达到干透牢固的程度，等环氧树脂自然晾干后剪断两端的丝，只保留探测器上方的丝面，移除丝框，将探测器从大理石平台上拆除并安装到丝张力测试系统上开始第二轮的丝张力及间距的检测以保证其达到技术要求。

(5) 焊接丝面及电子元器件的安装测试。将丝张力测试合格的探测器放置到专用支架上，把一侧的丝焊接到探测器侧面的焊盘上并安装相应的电子学器件，每一个探测器含有4路高压接头，对每一根丝进行连通性及短路测试以保证每一根丝都可以加上高压。

(6) 以上对于阳极丝的操作已经完成。对阴极丝、门极丝重复以上过程，最终探测器制作完毕。

2.5 小结

主体框架strongback及信号感应板padplane作为探测器的重要部件，前期经过大量的设计验证，之后确定了升级设计方案，并在美国BNL实验室制作完成。阳极丝、阴极丝、门极丝作为iTPC多丝正比室的核心组件，是此次探测器升级项目的重点。该项目的技术指标对于丝张力和丝间距的精度要求十分苛刻，因为其直接影响到STAR TPC的径迹重建精度、 dE/dx 粒子鉴别、使用寿命等。以早期的国内外硬件设备为基础平台，升级改造机械硬件部分及软件部分，实现了绕丝系统和丝张力测试系统的完全自动化。经过对其精度和稳定度的测试，发现这两套系统均可以达到较高的性能指标，并最终达到了 $51\pm 3g$ 的精度范围。而阴/门极丝经过张力补偿后其张力也达到了 $122\pm 6g$ 的精度范围。在丝梳的精确调控下，丝间距均满足了 $<10\mu m$ 的精度要求。两套系统在高精度的基础上完全实现了自动化，节省了大量时间。经过严格的制作流程24个iTPC多丝正比室最终如期制作完成，并开始进入到下一个批量性能测试阶段。

第三章 批量制作iTPC多丝正比室的性能测试

初级粒子在探测器中漂移不断撞击气体分子会电离出次级电子，这些次级电子则在漂移电场的作用下进入到端盖探测器的阳极丝附近进行雪崩放大进而在padplane上感应出脉冲信号。通过脉冲信号的幅度（ADC）及相应的位置和时间信息可以得到次级电子电离原点的三维坐标及 dE/dx 等重要信息。在这个过程中，探测器的增益及其均匀性、能量分辨率及其均匀性、正比性能指标均会影响探测器对上述信息的测量精度。本章将从探测器的工作原理、平台搭建、重要性能指标的测试结果、探测器在Run-18中的试运行表现等方面来逐步展开讨论。

3.1 iTPC多丝正比室的工作原理

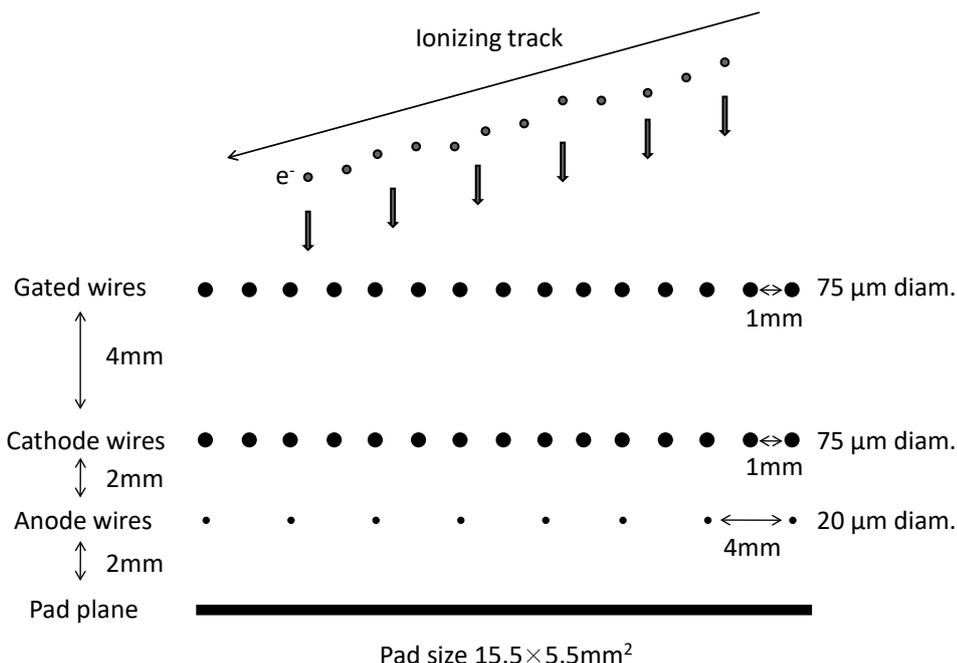


图 3.1: iTPC多丝正比室基本结构及原初电子漂移过程

如图 3.1所示，iTPC多丝正比室由等间距且平行的阳极丝（总共164根，丝间距为4mm，直径为20 μm 的镀金钨丝）、阴极丝（总共681根，丝间距为1mm，直径为75 μm 的铍铜丝）、门极丝（总共681根，丝间距为1mm，直径为75 μm 的

铍铜丝) 构成。阳极丝、阴极丝、门极丝距离信号读出板padplane的距离分别为2mm、4mm、6mm。由对撞产生的带电粒子会不断碰撞气体分子, 每一次都会损失能量且电离出原初电子。这些原初电子会漂移到阳极丝附近产生雪崩, 并在padplane上生成脉冲信号, 最终通过电子学以ADC的形式保存记录下来。阴极丝则为原初电子提供适当的漂移电场来协助其顺利到达阳极丝附近产生雪崩。雪崩会产生大量的电子同时会产生等量的阳离子, 这些阳离子会在漂移电场的作用下往阳极丝与阴极丝之间的漂移区漂移。通过对门极丝周期性的施加极性相反的电压可以实现开关门的作用, 将回流的阳离子全部吸收从而阻止其离开端盖探测器。

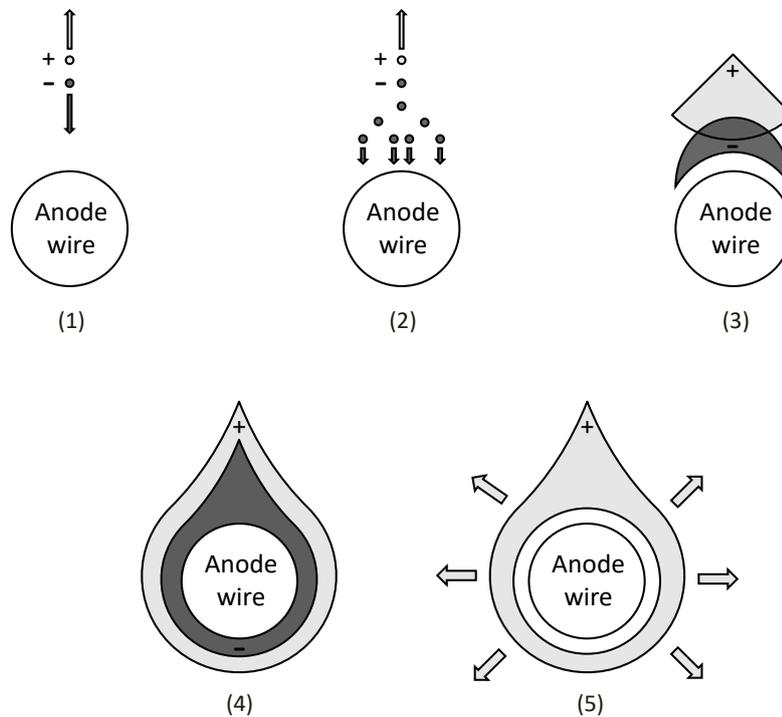


图 3.2: iTPC多丝正比室阳极丝附近的电子及阳离子雪崩发展过程

如图 3.2所示, 带电粒子与气体分子相互作用产生电子-阳离子对, 在漂移电场的作用下电子向阳极丝漂移而阳离子则往相反的方向漂移。当电子到达阳极丝附近(距离阳极丝表面 $<50\mu\text{m}$)时, 电子在极高的场强下获得足够的能量, 使气体分子进一步电离, 从而产生电子雪崩现象[38]。以单根阳极丝为研究对象并设其所在位置为x-y坐标系原点, V_{anode} 和 $V_{\text{cathode}}=0$ 分别为阳极丝及阴极丝上的电势, l 和 s 分别为阳极丝平面与阴极丝平面间的距离及阳极丝丝间距。

通过静电学的计算推导最终得到电势分布为[39]:

$$V(x, y) = \frac{CV_{\text{anode}}}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{2\pi l}{s} - \ln\left[4\left(\sin^2 \frac{\pi x}{s} + \sin^2 h^2 \frac{\pi y}{s}\right)\right] \right\} \quad (3.1)$$

电场分布为:

$$E(x, y) = \frac{CV_{\text{anode}}}{4\epsilon_0 s} \left[1 + \tan^2 \frac{\pi x}{s} \tan^2 h^2 \frac{\pi y}{s}\right]^{1/2} \left[\tan^2 \frac{\pi x}{s} + \tan^2 h^2 \frac{\pi y}{s}\right]^{-1/2} \quad (3.2)$$

其中 C 为阳极丝单位长度的电容, $\epsilon_0 \approx 8.85\text{pF/m}$ 为常用气体介电常数。当 $l > s \gg 2a$ (a 为阳极丝半径)时, C 可以近似为:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{(\pi l/s) - \ln(2\pi a/s)} \quad (3.3)$$

在两种极端情况下继续化简 $E(x, y)$, 当 $y \gg s$ 时:

$$E(x, y) = \frac{CV_{\text{anode}}}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (3.4)$$

当 $y \ll s$ 时:

$$E(x, y) = \frac{CV_{\text{anode}}}{2\epsilon_0 s} \quad (3.5)$$

式 3.4为阳极丝附近发生雪崩区域的电场分布。式 3.5为远离阳极丝时的电场分布, 显然与平行板电容器的场强分布相类似。一个电子经过平均自由程 λ 后会产生1个电子-阳离子对。经过第二个平均自由程后又会产生另外2个电子-阳离子对。以此类推, 在经过路程 dr 后, 总的电子数目为:

$$dn = n \frac{dr}{\lambda} = \alpha n dr \quad (3.6)$$

其中:

$$n = n_0 \exp\left[\int_{r_1}^{r_2} \alpha(r) dr\right] \quad (3.7)$$

n_0 为最初的电子数目, $\alpha = \frac{1}{\lambda}$ 为第一汤逊系数, 通常为位置 $r(x, y)$ 的函数。在靠近阳极丝附近的区域, 其电场分布与圆柱形正比管有着相同的表达式。通过式 3.4可以得到:

$$\alpha(r) = \sqrt{\frac{kNCV_{\text{anode}}}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}} \quad (3.8)$$

其中 k 在Ar气中约等于 $1.81 \times 10^{-17} \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1}$, 为计算第一汤逊系数 α 的Korrf近似表达式中的参数, N 为单位体积的气体内的分子数, C 为阳极丝单位长度内的电容。则通过积分可以求得最后的增益为:

$$G = \frac{n}{n_0} = \exp\left[\int_{r_1}^{r_2} \alpha(r) dr\right] \quad (3.9)$$

因为每根阳极丝的电场线在整个空间中并不相交，所以电子只会沿着电场线向着距离最近的阳极丝移动而产生雪崩，而不会漂移到其他的阳极丝附近，这便是阳极丝测定带电粒子位置信息的基础。移动的电子会在阳极丝上感应出负的脉冲信号，同时在相应的pad上感应出正的脉冲信号。通常阳极丝上一次雪崩会有2-3个pad响应，其中正对雪崩放大位置的pad上信号幅度是最大的，随着与雪崩正对位置距离逐渐增大，pad上的信号会成比例的减小。设在坐标为 (x_i, y_i) 的pad上测得的电量为 Q_i ，则由重心法可以重建出雪崩位置的坐标 (x, y) 为：

$$x = \frac{\sum x_i Q_i}{\sum Q_i}, \quad y = \frac{\sum y_i Q_i}{\sum Q_i} \quad (3.10)$$

而坐标 z 则需要具有时间信息记录功能的电子学分别记录次级电离电子从电离原点漂移至端盖探测器产生雪崩增益的时间，而电子的漂移速度是已知的，两者相乘便可以求得电离原点的 z 坐标位置。所以不断获得单次事例中的 (x, y, z) 三维坐标，然后将这些坐标连接成为平滑的曲线便可以得到初级粒子的漂移径迹。值得注意的是，电子在漂移和雪崩过程中会横向扩散，所以整个雪崩会呈液滴状。而等量的阳离子会包裹在阳极丝周围而形成阳离子鞘。由于电子的漂移速度远远大于阳离子，所以电子在相当短的时间内就会被阳极丝吸收掉，而产生的阳离子云缓慢的向阴极丝方向漂移。

3.2 iTPC多丝正比室阳极丝读出的性能测试

iTPC丝端读出的性能测试包括增益及增益均匀性测试、能量分辨率及能量分辨率均匀性测试、强辐射下的稳定性测试、正比性测试等。首先增益及增益的均匀性测试最为关键，在TPC实际工作中，增益需要维持在2500左右，要避免应用较大的增益，因为它可以导致大量的阳离子回流从而对探测器造成负担。而通过对增益均匀性的测量可以排查探测器的增益是否在不同区域起伏过大从而影响整个探测器的性能。其次能量分辨率在一定程度上代表探测器及所使用电子学系统对能量的分辨本领，能量分辨率及其均匀性越高则探测器对 dE/dx 的测量精度就越高，那么便可以更好的鉴别粒子。通过对探测器施加高强度辐射有助于模拟探测器在真实工作环境中的工作状态，当大量电子进入端盖探测器后会在丝端带来较大的电流，如果探测器耐辐射能力较低则会直接进入瘫痪状态，所以有必要对探测器的每个电流通道的耐辐射测试。最后探测器的正比性也会在一定程度上影响探测器的工作性能，需要保证探测器在增益2500附近有较好的正比性。

3.2.1 测试平台搭建

为了对升级批量制作的每个iTPC丝端性能做一个比较完整的测试，经过前期对各种功能硬件设备的整合、补充，最终建立起一套综合硬件设备平台。其主要包括密封测试箱、气体混合系统、温湿度及压强传感器、X射线管及 ^{55}Fe 放射源、X-Y 2D步进导轨、多道脉冲分析仪测试系统、示波器、信号发生器、低压电源、集成有各种电子学插件（高压模块、计数器模块、信号转换模块等）的NIM机箱。图 3.3显示了搭建完毕后的部分硬件设施。

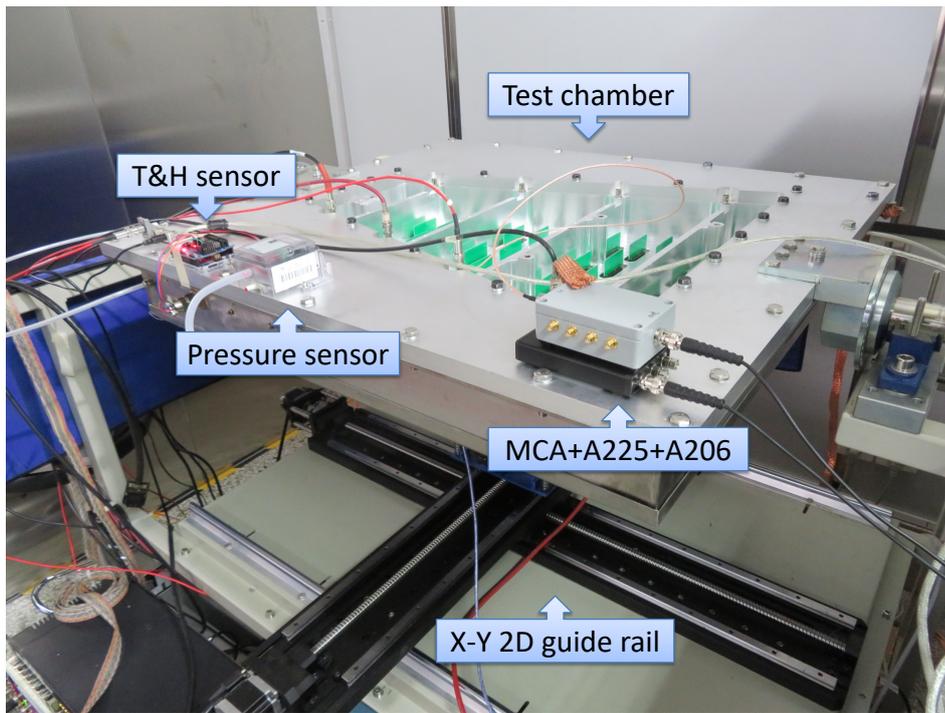


图 3.3: iTPC丝端性能测试硬件设备平台

整个密封箱分为底座和屏蔽罩两部分，底座使用2cm的厚铝板经线切割机切割成型，屏蔽罩则使用不锈钢片焊接而成。 ^{55}Fe 放射源强度较弱，直接照射不可能穿透不锈钢护罩，所以在护罩上掏空与探测器相同尺寸的梯形作为X射线的照射窗口，使用厚度为 $100\mu\text{m}$ 的软质PCB膜来进行密封。密封箱底座和屏蔽罩通过螺栓固定，中间镶嵌一层厚度为0.5cm的硅胶垫来辅助压紧密封。

考虑到后期需要对探测器实际工作的157根阳极丝（共164根）进行增益稳定性扫描，放射源必须不断被移动来对准每一根将要测试的阳极丝。 ^{55}Fe 放射源的直径为5mm，使用时固定在金属托盘中。金属托盘连同X射线管一起放置在X-Y二维导轨上方的升降平台上，通过控制PC端的移动平台控制软件，来精确调节放射源的位置及高度。在批量测试阶段，基于继电器、单片机、多道脉

冲分析仪等为其开发了一套自动测试系统，结合X-Y二维导轨可是实现对每一根丝前中后三个位置的 ^{55}Fe 图谱的抽取，经过程序自动计算出增益以及能量分辨率。

测试使用的气体为P10 (90%Ar+10%CH₄)，其纯度可以达到99.999%。气体混合系统的混气精度可以达到0.1%，可以通过控制气体的流速来得到适合实验的P10排出速度（在第一天的充气阶段混气比例设置为126:14，一天之后密封箱内空气排净之后比例调节为45:5）。对于测试环境中温度和湿度，主要通过空凋制冷和除湿机来达到精确控制。测试环境所需要的温度为室温25°C。测试箱的内外压差是需要重点控制的变量，实验要求控制在高于标准大气压2mbar。

3.2.2 增益及能量分辨率的均匀性扫描

增益及能量分辨率的均匀性、稳定性是一个很重要的性能指标，直接影响到探测器的粒子鉴别能力，即电离能损 dE/dx 。具体来说，能对它产生影响的主要有两方面：第一，探测器三层丝的挂载精度、pad平面的平整度。如果挂载和pad平面的精度不佳的话，会导致三层丝距离pad平面的距离高低不平，这样直接影响到电场的均匀性从而对增益产生影响。第二，阳极丝、阴极丝、门极丝的丝张力。丝张力在要求的精度范围内浮动时，通常不会对探测器的性能有什么影响。但是在探测器制作的过程中会出现胶体并未粘牢或者在搬运过程中丝松动的现象，如果丝张力松脱到重力可以至其弯曲的地步，则同样会导致电场不均匀从而影响增益稳定性。故对于每一个量产制作iTPC，不但必须检测每一跟阳极丝上的增益，还需要把每一根阳极丝细分为三个点位进行重复检测，其目的就是要反复检验探测器工作性能的均匀性。

对于每个探测器，分别对探测器的157根阳极丝的左端、中端、右端进行了3轮共471个点的增益及能量分辨率扫描，图 3.4至图 3.6分别显示了批量测试完毕性能达标后准备运往美国STAR实验室的SN29-SN31号共3个iTPC增益及增益均匀性的测试结果（其中增益经过了温度及气体压强的修正，具体的修正方法参见文献[40]）。SN29-SN31号探测器其增益均值达到了2500左右。然后对每一个探测器的471个增益测试数据进行高斯拟合，其中增益拟合参数中的Sigma/Mean可以作为衡量探测器增益均匀性的参量，测试结果表明3个探测器的增益均匀性均好于1.5%。

在对探测器能量分辨率的检测中，全能峰的RMS宽度与全能峰的峰位比值可以在一定程度上衡量探测器对能量的分辨能力。图 3.7至图 3.9分别显示了相应的3个探测器的能量分辨率扫描情况。其中SN29及SN30号探测器能量分辨率分布保持平稳，SN31号探测器出现了轻微的起伏，注意到其中上浮的位置几乎是单根丝三点同时起落，所以形成的原因可能与每一根丝的丝质或每一根丝前

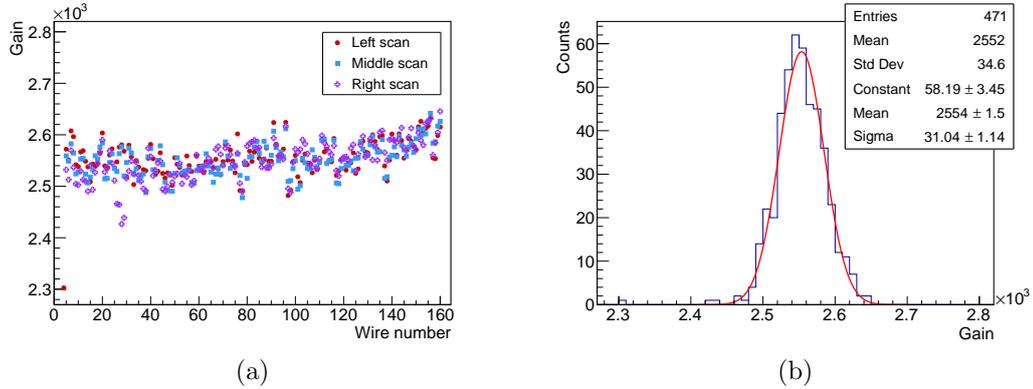


图 3.4: SN29号探测器增益分布情况 (增益均值2554, 增益均匀性1.21%)

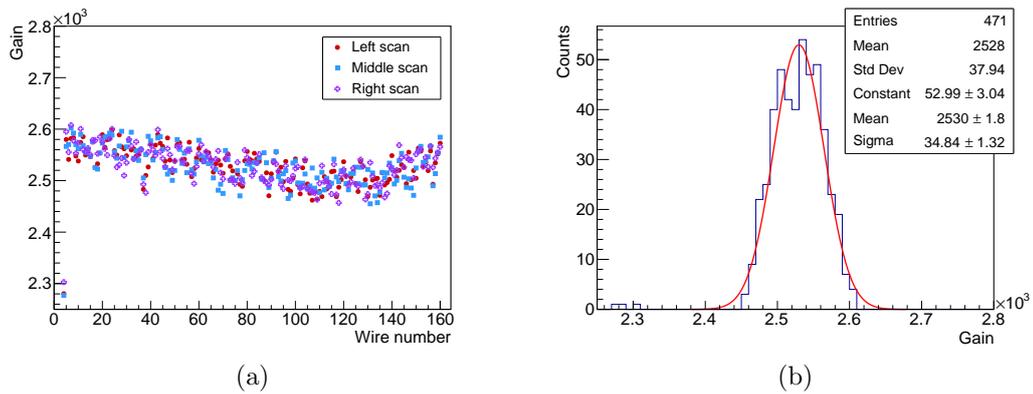


图 3.5: SN30号探测器增益分布情况 (增益均值2530, 增益均匀性1.37%)

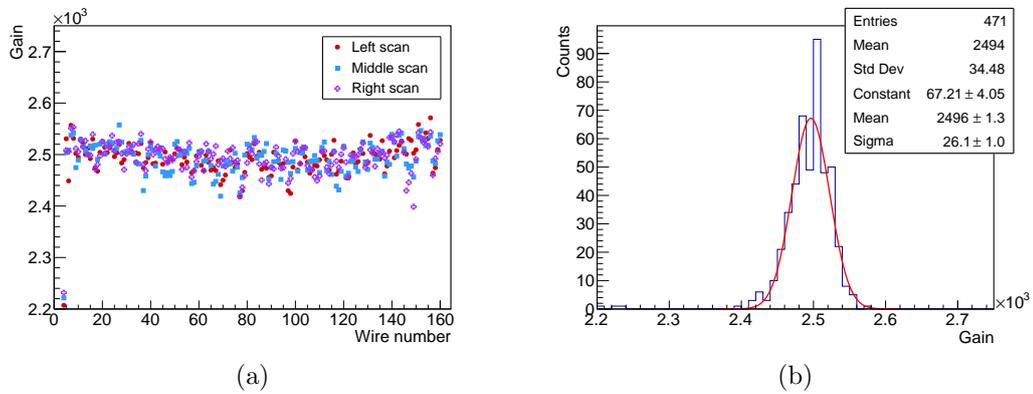


图 3.6: SN31号探测器增益分布情况 (增益均值2496, 增益均匀性1.05%)

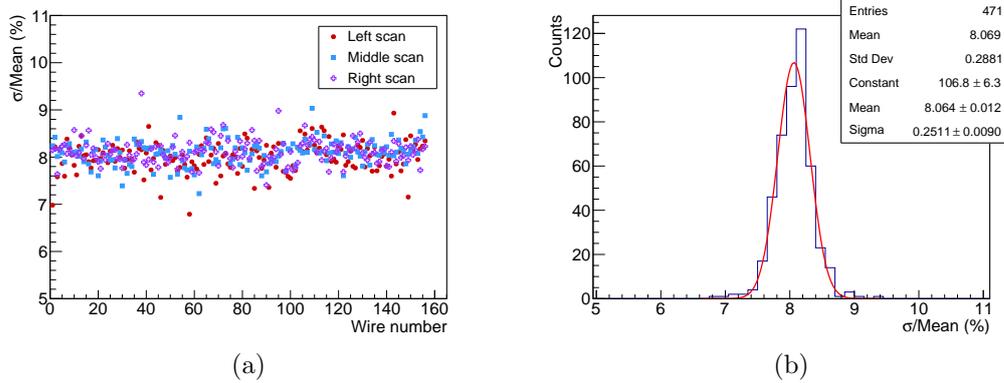


图 3.7: SN29号探测器能量分布情况 (均值8.069%)

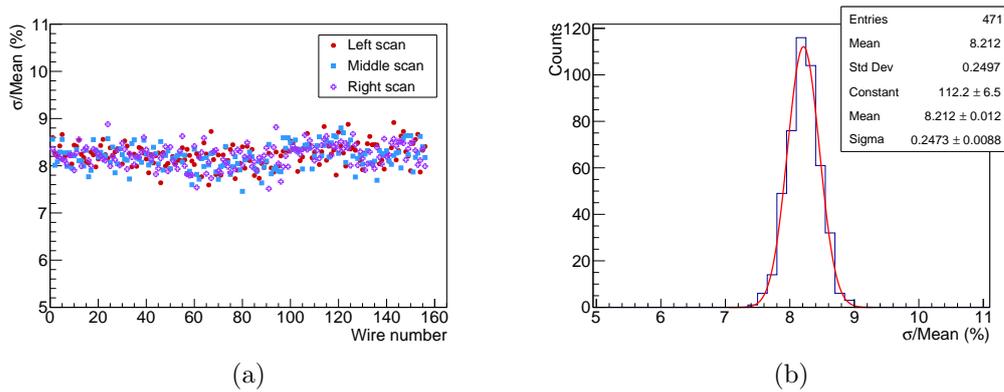


图 3.8: SN30号探测器能量分辨率分布情况 (均值8.212%)

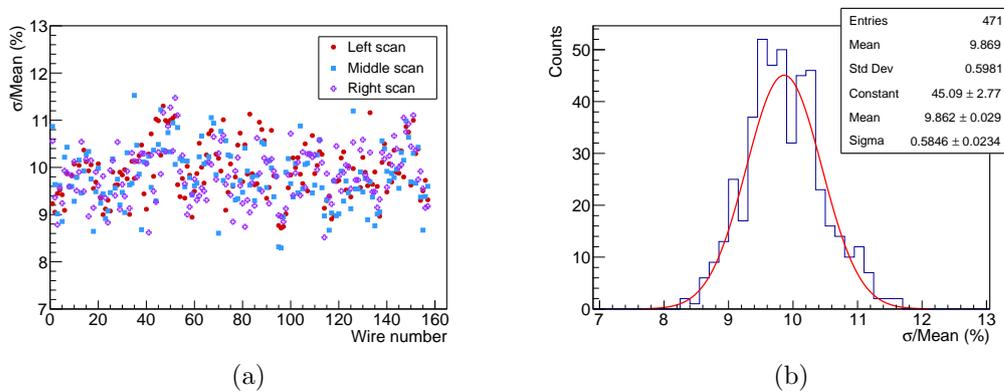


图 3.9: SN31号探测器能量分辨率分布情况 (均值9.869%)

置ABDB电子元器件有关。

在对探测器的正比性检测中，常用全能峰与逃逸峰的峰位比值来衡量其正比性的好坏。实验中通过一组阳极丝电压扫描（1080-1340V）来观察双峰峰位及其比值的变化。如同预期，随着电压的升高，全能峰与逃逸峰均呈现出指数增长的趋势。在1120V时全能峰与逃逸峰的峰位比的实验值为1.98，与理论值 $(E_1+E_2)/E_1=1.97$ 十分的接近（ E_1 为X射线光子被K壳层吸收后释放出的光电子能量， E_2 为光子再在L壳层上激发出俄歇电子的能量）。但是随着阳极丝扫描电压的逐渐升高，该比值在不断降低。这是因为随着电压的不断升高，增益呈指数增长，增益越大则积累的空间电荷越多。大量的阳离子会在阳极丝与阴极丝之间产生一个等效的压降，该压降会降低增益。而全能峰处产生的阳离子远远多于逃逸峰处，其压降要比逃逸峰更明显，故两者比值呈现不断下降的趋势。如果电压继续升高，两者比值将接近1，探测器将进入饱和区。

3.2.3 强辐射下的稳定性测试

在大型高能物理对撞试验中，保证探测器可以在高亮度高对撞频率下稳定工作是及其重要的。在对撞机运作期间，会有大量的电子涌入TPC的端盖探测器，从而在丝端引起较大的电流。当该电流超过探测器所设定的电流阈值时，探测器便会进入trip状态而瘫痪掉。故在最后要对每个iTPC探测器丝端的耐辐射能力进行测试，以保证它可以在高强度的工作条件下稳定工作。

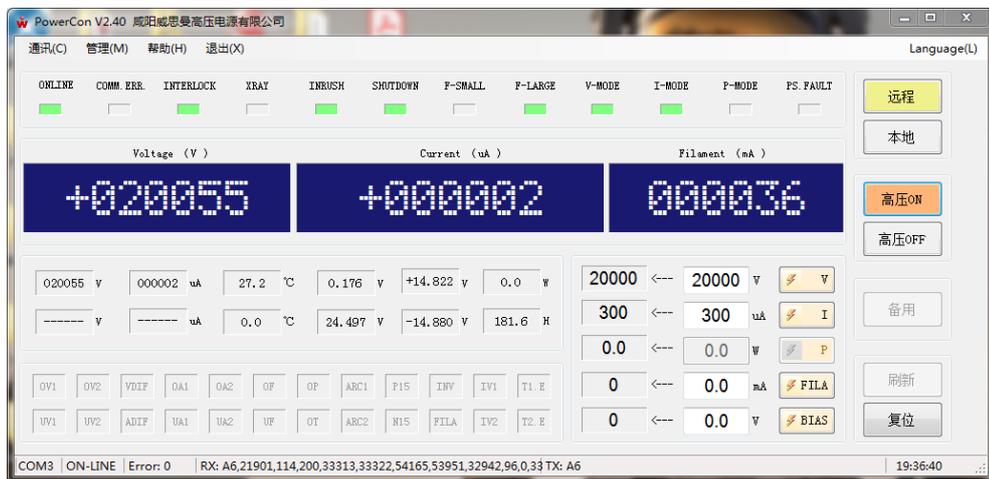
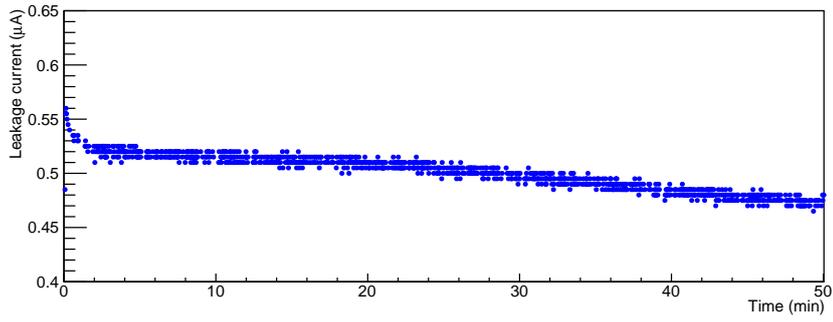
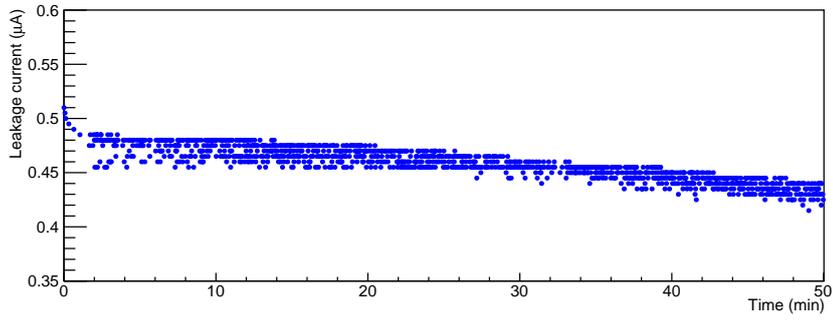


图 3.10: X射线管控制软件操作界面

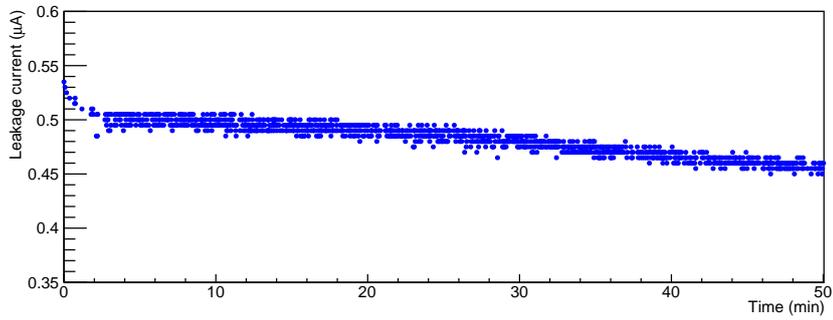
为了测试其稳定性，使用铜靶X射线管对每一个iTPC进行了耐辐照测试，在一定的立体角内发射的X射线引起的电流类似于在典型的RHIC碰撞中由腔室发射的带电粒子所引起的电流。图 3.10显示了X射线管控制软件



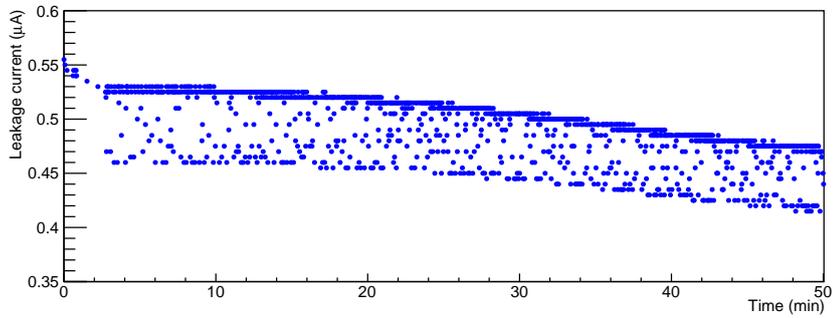
(a)



(b)



(c)



(d)

图 3.11: SN29号量产iTPC所有高压通道中的漏电流随时间（50分钟）的变化 (a)通道1; (b)通道2; (c)通道3; (d)通道4

操作界面。其中管电压范围为0-50kV，通过控制管电压可以使X射线的能量在0keV到50keV之间变化。管电流范围为0-1000 μ A，其大小直接影响到x射线的频率。例如，在管电压25kV管电流500 μ A的情况下，X射线频率可以达到 2.3×10^5 HZ。在具体的测试中，使用CAEN 1471电压模块自带的电流监控功能及模块控制软件CECO 2020来获取探测器阳极丝上的实时电流。每个探测器有4个高压通道，每个通道连通40根阳极丝，所以每个通道都需要进行严格测试。以SN29号探测器为例，图 3.11显示了其4个通道的漏电流随时间的变化。每个通道的电流大约在500nA左右，这与探测器在实际对撞环境下所承受的电流大小相差无几。在这种高仿真辐射的测试下，近1个小时内探测器4个通道工作稳定，并没有出现trip现象。值得注意的是，随着射线管工作时间的推移，射线管自身的发热会导致所输出的X射线频率下降，所以在图中可以观测到电流随着时间的推移有略微降低的趋势。

3.3 iTPC多丝正比室pad读出的性能测试

相较于iTPC丝端读出性能测试，pad读出性能测试则显得更为关键。因为虽然已经对探测器丝端增益、能量分辨率、耐辐射稳定度进行了全面测试，但是仍然需要对pad读出的性能进行全面测试，因为在STAR TPC实际工作中数据采集系统获取到的数据信息全部来源于pad而非阳极丝。pad读出的本底水平决定了探测器是否具有良好的信噪比，而pad上信号幅度与丝端信号幅度的比例、探测器的位置分辨率等都会在一定程度上影响到探测器对于dE/dx的测量精度。

3.3.1 STAR DAQ测试系统简介

STAR DAQ测试系统主要包括三大部分：读出主板（RDO）、读出卡（FEE）、触发器（Trigger）。单个读出主板含有18个读出卡插槽，可以通过IDE线缆把FEE与RDO相链接，读出主板与电脑间通过一根光纤来实现数据的传输与存储，并需要用5V的低压电源对其供电。每个读出卡有32个通道，使用前置放大ASICs芯片对信号进行放大积分，然后用STMicroelectronics生产的半定制芯片对其进行数字化处理最终转化为ADC（每一个ADC大约等价于500个电子所携带的电量[41]）。图 3.12 显示了正在使用的读出主板与读出卡的实物图。

STAR DAQ1000型读出板包含9组Xilinx FPGA芯片组（XC3S200），每组可以同时处理来自两个50针端口的FEE传输信息。在正常工作时可以通过计算机终端来为RDO Xilinx芯片上的可编程只读存储器（XCF02S）进行编程，通



图 3.12: STAR DAQ的读出主板与读出卡，两者可以通过IDE线缆实现数据传输

过JTAG链也可以对RDO上其他的电子元器件进行编程。经过编程后的信息比如各种甄别程序会进入到各自的FEE中（FEE上的电子元器件只能通过RDO板上的PROM进行编程），只有经过事例筛选后只有符合甄别程序的事例信息会进入到FEE中进行放大、成型、数字化，这大大降低了对计算机存储系统的占用率。触发器需要用信号发生器与其配合使用。以Tektronix AFG3102C作为信号发生源，周期性（2000HZ）的产生一个幅度为600mv的脉冲信号并输入到低阈值判别器CAEN N844中，信号经过筛选转化为可识别的NIM信号并最终输入到触发器中，接收到触发信号后FEE处于开门状态开始采集数据，经过一定时间的数据采集然后再进行关闭，如此往复循环。

3.3.2 本底测试

搭建好整套测试系统后开始对升级后的iTPC进行pad读出的测试。在本次试验中计划同时测试iTPC的插槽25和插槽26（整个iTPC共55个插槽），把两个读出卡FEE连接到主板RDO上，一共可以监控并获取64通道内的实时电量。首先是本底测试。整个测试环境为室温25°C，测试箱内冲入P10气体（90%Ar+10%CH₄）并保持在高于大气压2mbar，使用⁵⁵Fe作为放射源，正常工作电压设置为1120V，本底测试时需要关闭阳极高压电源。

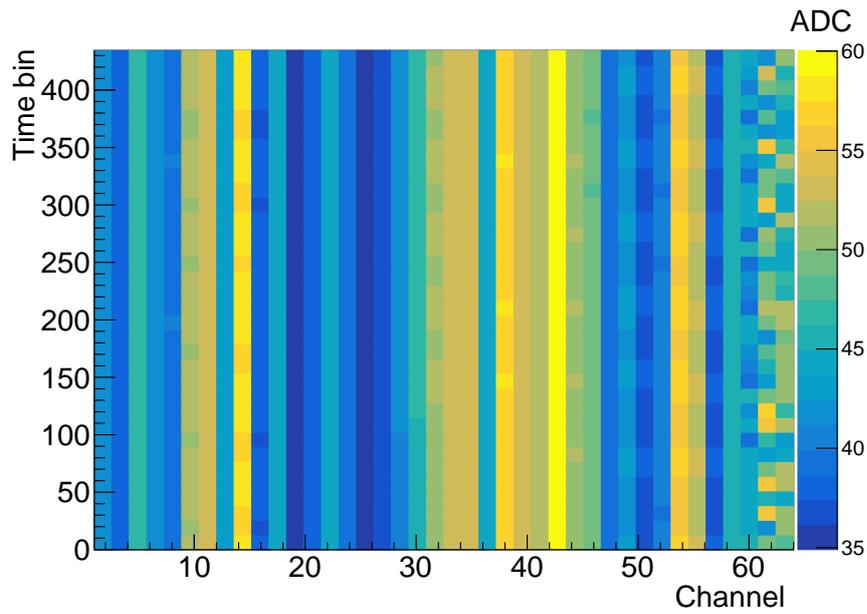


图 3.13: iTPC 64通道在435个time bin中的本底电量分布。x轴为通道编号(共64道), y轴为时间信息time bin(共435个time bin), z轴代表在某通道某时间节点上的本底ADC大小, 具体数值可以参考右边的色卡

本底测试结果如图 3.13所示, 需要注意的是STAR DAQ与之前在丝端测试中所用到示波器及多道脉冲分析仪不同, 它可以提供时间信息, 运行本底测试时, 运行脚本固定1000次事例, 每一个事例又分成435个time bin, 每个time bin持续时间为100ns, 这样经过1000次重读测试, 可以得到任何一个pad在任何一个timebin内的平均本底, 而整个探测器64个通道的本底水平在35至60ADC内浮动。

3.3.3 脉冲信号捕捉与pad增益测试

在充入P10气体后, 室温气体压强等条件保持在先前所叙述的标准, 等待信号稳定大约需要12个小时。高压加到标准的1120V后, 将 ^{55}Fe 放射源对准探测箱的窗口, 然后通过STAR DAQ测试系统对探测器的插槽25 和插槽26共64路进行数据获取。(Physics run) 获取到的数据为已减去本底的ADC, 且在最终的数据文本中只保存有信号的部分。通常电子在阳极丝上雪崩放大后, 2到3个pad会同时感应到信号, 比较大的脉冲信号比如高能宇宙射线会有大于3个的pad同时响应。这样需要统计一个完整的pad上所感应到的脉冲信号就要把所有相应的pad上的ADC相加。如图 3.14所示, 这是用该电子学系统捕捉到的一个完整电量的脉冲信号。

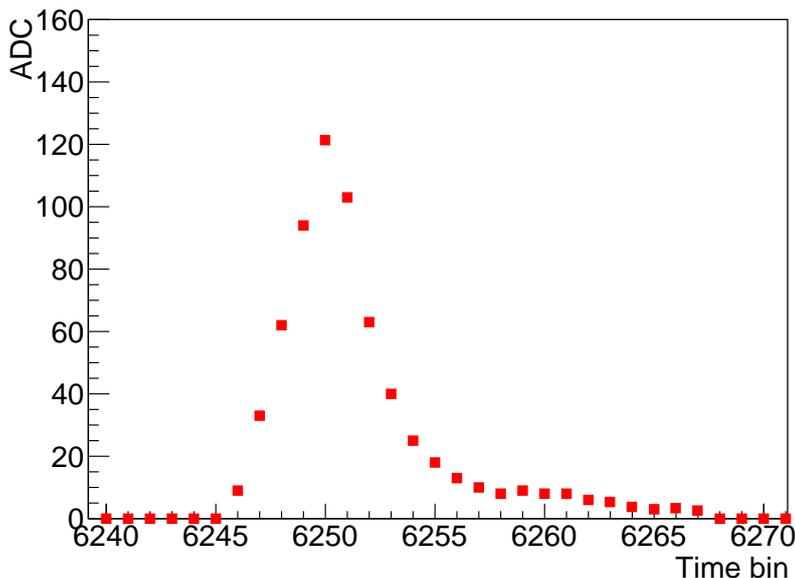


图 3.14: 一个典型的完整电量的脉冲信号, 共持续了22个time bin, 每个time bin为100ns

接下来把信号在各time bin上所携带的ADC积分便可以得到该信号所携带ADC的总量。如图 3.15(b)所示, 27119个完整的脉冲信号所携带的总ADC被填充到一维直方图中。P10气体的平均电离能为26.2eV。因此, 当5.9KeV的X射线通过气体时, 它将产生大约225个电子对应主峰(5.9keV)或110个电子对应逃逸峰值(2.9keV)。其中主峰的峰位在569ADC处, 在STAR电子学中1ADC等价于500个电子, 那么pad上的增益便可计算出为1264 ($569 \times 500 / 225$)。而阳极丝上的平均增益为2500。故阳极丝与pad的信号幅度比为1.98:1。除此之外还需要注意的是, 使用STAR DAQ得到的pad上的 ^{55}Fe X射线谱图其双峰并不如先前使用多道脉冲分析仪对阳极丝的测试中分开(能量分辨率)的那么明显, 如图 3.15(a)与图 3.15(b)所示, 其原因是因为STAR DAQ测试系统其量程上限为1024ADC, 相当于把整个信号最大分为1024等份, 并且最终得到的数据ADC只能取整, 这个精度远远达不到多道脉冲分析仪的精度(最大可以将信号分为8192等份)。

3.3.4 位置分辨率测试

对于STAR TPC而言, 最主要的两项测量任务为电离能损 dE/dx 的测量和粒子径迹的重建。增益的稳定性和能量分辨率影响前者, 而位置分辨率则影响后者。当电子在阳极丝上雪崩放大后会形成液滴状电子云, 而该电子

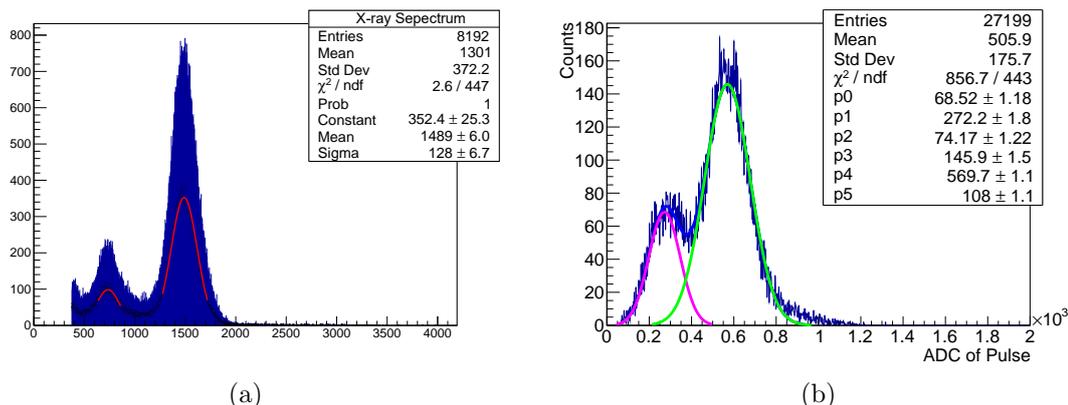


图 3.15: (a)使用MCA对于丝端测试中的 ^{55}Fe X射线谱图；(b)使用STAR DAQ对于pad测试中的 ^{55}Fe X射线谱图

云接下来会投影到pad上，通常其面积覆盖2-3个pad（STAR iTPC pad的尺寸为 $15.5 \times 5.5\text{mm}^2$ ），并在pad上感应出一定比例的信号。单个pad具体能感应到阳极丝总信号的比例是我们需要测量和计算的。而且位置分辨能力也可以等效为探测器对于放射源移动的灵敏度。位置分辨能力越好，则放射源移动同样的距离单pad上的信号幅度衰减越大，也就是说其对位置的移动更加敏感。对于以上的内容，通常称为pad 响应函数（Pad Response Function, PRF）。PRF将单个pad上感应到的信号幅度/阳极丝上的信号幅度与导轨上放射源的位置相关联，而其中PRF的宽度（ σ ）便可以作为位置分辨率的关键度量量[42]。在试验中我们需要准直度很高的射线源来作为近似点源。以Pad（编号A51 C12）作为研究对象。最初尝试使用 ^{55}Fe 加0.85mm直径的准直器来作为点源，但是其信号频率太小，单pad上的信号频率 <20 ，远远达不到测试要求。

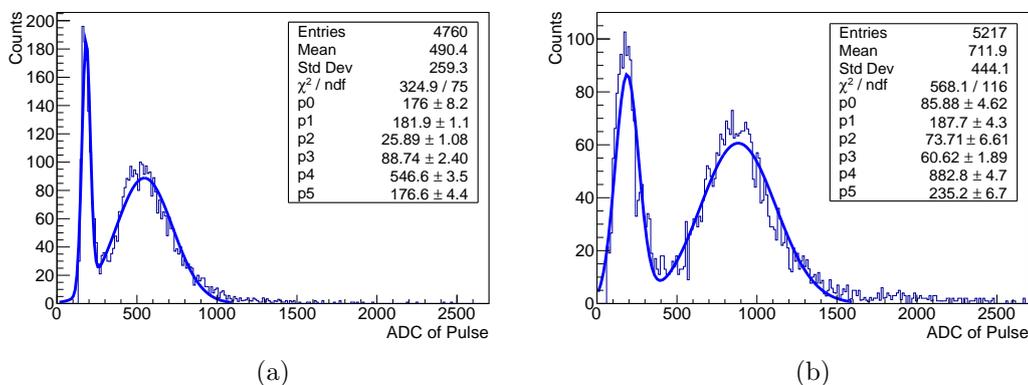


图 3.16: (a)高频射线管在单pad上的信号图谱；(b)高频射线管在单pad及其周围pad上的ADC求和全电量信号图谱

经过不断尝试，使用高频X射线管加0.85毫米的准直器来作为点源可以满足实验要求，在X射线管电流为 $500\mu\text{A}$ 时，在该pad中心处其信号频率高达 2.4kHz ，当然也不是越大越好，信号频率过高会导致信号重叠，在后期用root筛选信号时会造成麻烦，故最终调节X射线管的电压使pad中心位置信号频率稳定在 1500Hz 左右。通过3D位移平台可以精确控制X射线管的移动。以最初位置（约在该pad中心位置），以每次 0.625mm （导轨控制软件中50个步长）的增量朝着同一个方向扫描，然后回到最初位置，再朝着相反的方向扫描。在每个位置，测量Pad（编号A51 C12）上的信号幅度，并计算其与阳极丝上的信号幅度比[42]。图 3.16(a)为X射线管在坐标系大约 0mm 处pad（编号A51 C12）上的信号图谱。图 3.16(b)为X射线管在坐标系大约 0mm 测量pad（编号A51 C12）及其所有相邻pad上所有加和ADC的信号图谱，即pad上感应出的完整信号。这样根据前面阳极丝与pad上响应的信号幅度比（ $1.98:1$ ）便可以计算出阳极丝上的信号幅度。在该测试中共扫描27个点，并且通过高斯函数拟合所有数据。如图 3.17所示，PRF的宽度（Sigma）为 2.545mm ，pad/阳极丝信号占比（Constant）为 30.47% ，重建出的pad（编号A51 C12）中心位置（Mean）为 0.028mm 。当然也可以通过另一种方法来测量PRF的宽度，固定X射线管的位置在该研究pad上，并读出该pad及其相邻pad的信号相应幅度，并用高斯函数拟合数据。但是这种做法最大的缺点就是数据点太少，通常为3个（只有3个pad有响应），拟合出来的高斯分布误差较大，显然不如扫描法精确。

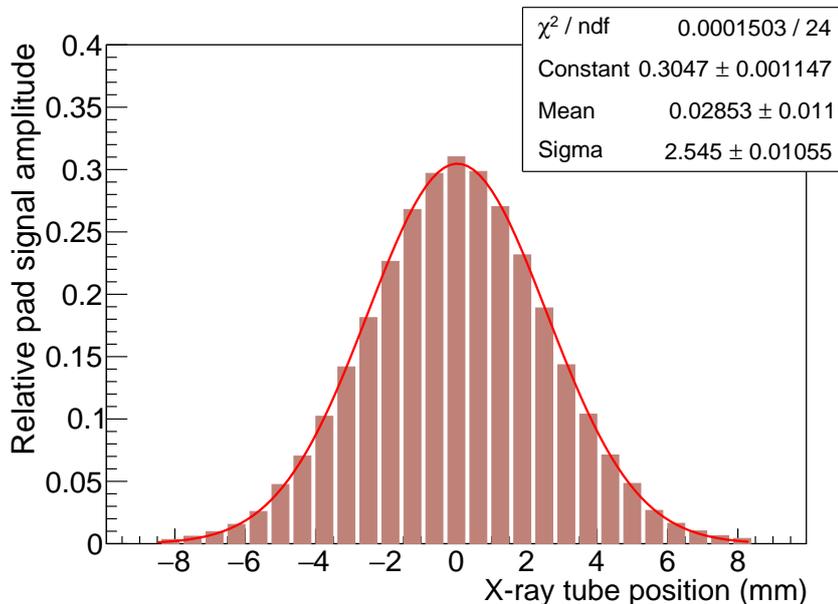


图 3.17: PRF响应函数高斯拟合曲线

3.4 Run-18中iTPC的试运行表现

随着iTPC的批量制作，制作完毕且达到性能测试要求的探测器被陆续运往BNL实验室。在RHIC run18中，在STAR TPC上安装的第一个升级后的iTPC (sector 20) 将进行试运行。该探测器在山东大学高能物理实验室经过全面测试，其增益均匀性好于1%，强辐射条件下漏电流稳定，且在真空条件下可以稳定工作。在BNL实验室，该探测器在正式安装前经过第二轮严格性能测试以确保性能测试结果无误。在试运行中，STAR DAQ 数据获取系统成功读取了iTPC全部55个更新后的FEE上的数据。在对200GeV Isobar和27GeV Au+Au事例重建后发现，相比于旧的iTPC，升级后的iTPC其打击点数由最多的45个提升至72个，横动量 P_T 的测量阈值降为60MeV/c，赝快度接受区间 η 向前延伸了0.4个单位[43]。并且如图 3.19所示，在对isobar和Au+Au数据样本进一步分析后发现dE/dx分辨率都得到了明显的提升。截止到2019年2月STAR已经将全部iTPC安装调试完毕，如图 3.19所示，相比较升级前，升级后在探测器端盖的内扇区粒子径迹密度明显增加，至此，iTPC升级项目顺利完成。

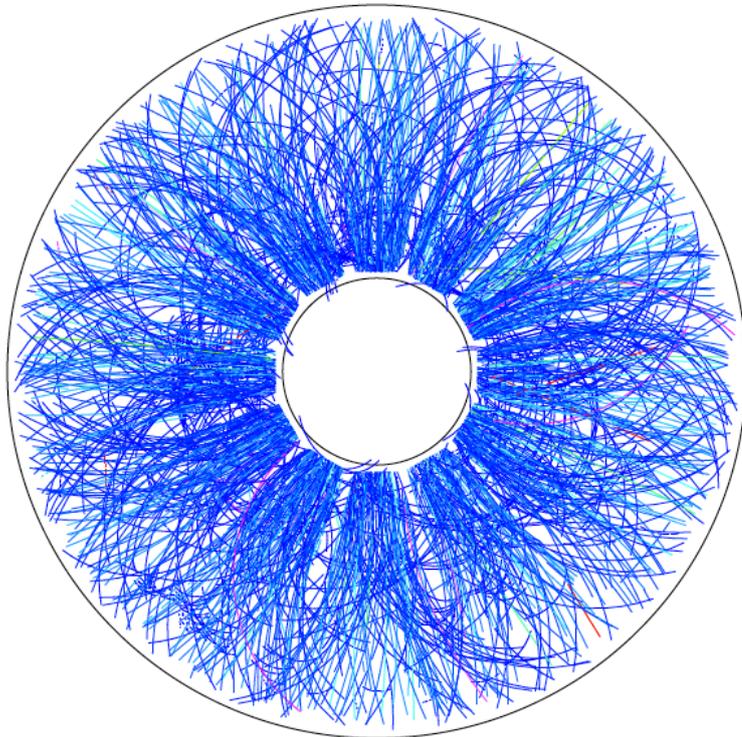


图 3.18: 升级后的STAR TPC对于带电粒子径迹的重建投影

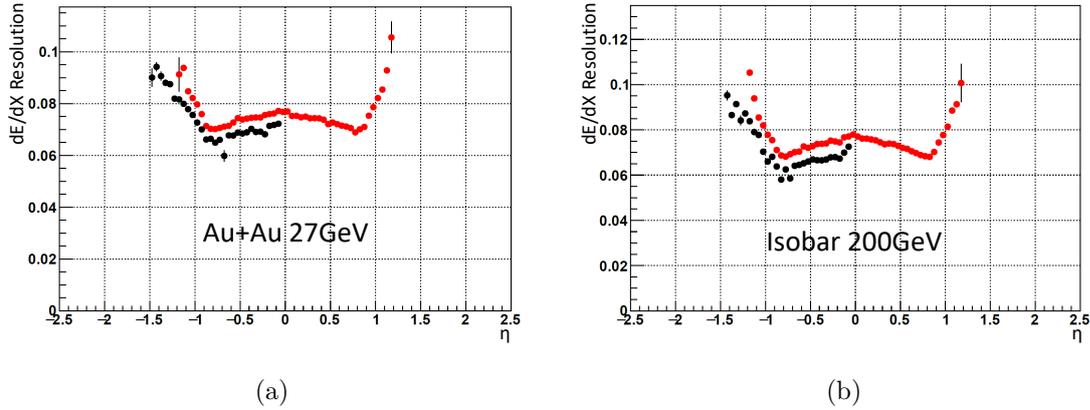


图 3.19: (a)27GeV Au+Au下STAR TPC在各赝快度区间的 dE/dX 分辨率表现；(b)200GeV Isobar下STAR TPC在各赝快度区间的 dE/dX 分辨率表现

3.5 小结

对于iTPC的性能测试主要分为丝端测试和pad测试。在丝端测试中，其增益可以稳定在2500左右（1120V）且在这个增益附近具有良好的正比性，增益均匀性好于2%，能量分辨率平均可以达到10%左右。在高强度X射线辐照下，漏电流稳定在500nA左右。在pad测试中，本底平均保持在50ADC左右，pad感应全信号幅度与阳极丝信号幅度比达到1: 1.98，PRF相应函数峰值及单pad与阳极丝信号幅度最大占比最大达到30%左右，位置分辨率达到2.5mm左右。后期运往BNL实验室进行安装试运行后，相比于未升级iTPC的STAR TPC，升级后其重建径迹打击点数由最多的45个提升至72个，横动量 P_T 的测量阈值降为60MeV/c，赝快度接受区间 η 向前延伸了0.4个单位，且 dE/dX 分辨率在各 η 区间都得到了明显的提升。

iTPC在山东大学高能物理实验室的量产工作始于2017年9月，期间进展顺利。截至2018年4月中旬，完成了全部24个探测器中的18个测试并运输到了BNL实验室进行第二轮检测。于2018年7月该项目正式完工，与此配套的新RDO和FEE在BNL也开始陆续量产。在随后的9个月中，STAR TPC将会停止运行，所有升级后的iTPC将在8月至12月内全部替换完成并进行初步的宇宙线测试。截止到2019年2月，STAR已经完成对全部iTPC探测器的调试运行工作。

第四章 下一代对撞机（EIC）及探测器的性能需求

原子核以及核子（质子和中子）的起源和结构一直都是物理学家们最为关注的课题之一，因为它们基本上占据了可见宇宙的所有质量。半个世纪的研究表明，核子本身由被称作夸克的更基本粒子组成，通过交换胶子结合在一起，并在此基础上建立起一套强相互作用的基本理论，称为量子色动力学（Quantum ChromoDynamics, QCD）。QCD将夸克和胶子之间的作用力归结于它们所携带的“色荷”。色荷的存在使胶子之间存在相互作用力，核子的大部分质量也由此产生。为了更好的研究QCD理论，电子-离子对撞机（Electron Ion Collider, EIC）成为了下一代高能物理最前沿的大科学仪器之一。考虑到未来EIC的亮度及碰撞率远远高于目前所有运行中的加速器，传统的多丝正比室由于其开关门机制会周期性的带来一段延迟时间使探测器无法读出，所以开发一种可连续读出的端盖探测器便成为一项课题任务。经过STAR iTPC升级项目，作者在此基础上设想一种新型时间投影室结构：保留阳极丝，撤换掉阴极丝和门极丝，摒弃掉传统多丝正比室的开关门机制，与之取代的是现在发展火热的微结构气体探测器，比如气体电子倍增器等。这样阳极丝依然起到主要作用，多层微结构气体探测器起到辅助作用并且通过交叠使其尽最大可能的去抑制回流的阳离子。本文第四章至第八章将会对这种新型时间投影室的研发过程进行一个具体的阐述，并将分别在模拟以及实验角度去论证它的可行性。

4.1 电子-离子对撞机（EIC）简介

EIC作为下一代QCD前沿科学的大科学装置，它可以帮助我们在深入到胶子所主导的层次上进行之前没有过的研究，提供核子束流来确定海夸克和胶子分布与核子自旋的相关性，以及以重离子束流对撞为基础进一步研究胶子的饱和和密度等。EIC与现有高能物理大科学装置最大区别在于，它可以高度极化（70%）的电子束流和核子束流以及各种重离子束流，并且相比较目前世界上的对撞机至少要提升两到三个数量级的亮度（ $10^{33-34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）。要达到如此高的性能要求，大量的新技术研发必不可少。比如要获得如此高的亮度，冷却强子束流方面的技术革新显得至关重要。目前布鲁克海文国家实验室正在研发相干电子冷却技术以突破这类技术瓶颈。而在探测器研发方面，与EIC匹配的下一代探测器必须具有极高的粒子检测和粒子识别能力、较高的电子辐射耐受性、连续读出能力等。要应对以上研发挑战需要联合世界上所有最前沿的对撞机和探测器技术。

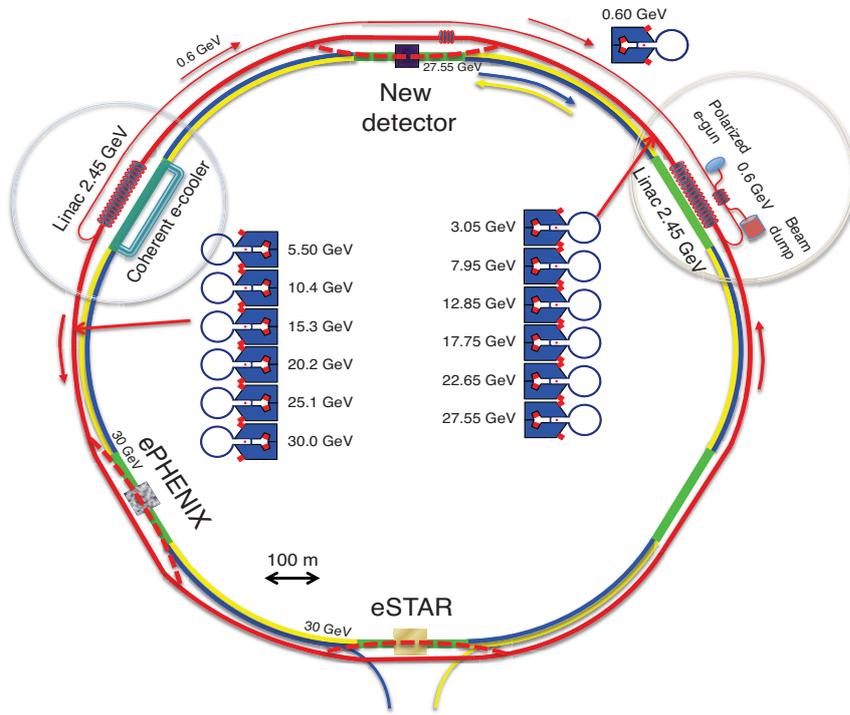
美国布鲁克海文国家实验室（Brookhaven National Laboratory, BNL）的RHIC以及杰斐逊国家实验室（Jefferson Lab, JLab）的连续电子束加速器（Continuous Electron Beam Accelerator Facility, CEBAF）在过去的十几年中已经率先开启了相关的研发计划[44]。其他的如欧洲的LHC以及中国兰州重离子加速器研究装置（Heavy Ion Research Facility of Lanzhou, HIRFL）也有类似的对撞机改造升级计划。目前由两个独立的EIC设计方案已经率先在美国开启，两者都是在现有的基础设施上加以改造。一个是布鲁克海文国家实验室eRHIC，如图 4.1(a)所示，它基于能量回收加速器（Energy Recovery LINAC, ERL），其产生的电子束流将会与RHIC现有的高能计划质子和核子进行碰撞。另一个是杰斐逊国家实验室的MEIC，如图 4.1(b)所示，它在经过升级后的CEBAF基础上外加全新的电子离子对撞复合环以达到预期的碰撞参数。

	electron	proton	Au
Max. beam energy [GeV/n]	10	250	100
Bunch frequency [MHz]	9.34	9.34	9.34
Bunch intensity (nucleons/electrons) [10^{11}]	0.36	4	6
Beam current [mA]	50	556	335
Polarization [%]	80	70	
RMS bunch length [mm]	2	50	50
RMS norm. emittance (e-p/e-Au) [μm]	16/40	0.2	0.2
β^* [cm]	5	5	5
Luminosity [$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]		2.7	1.6

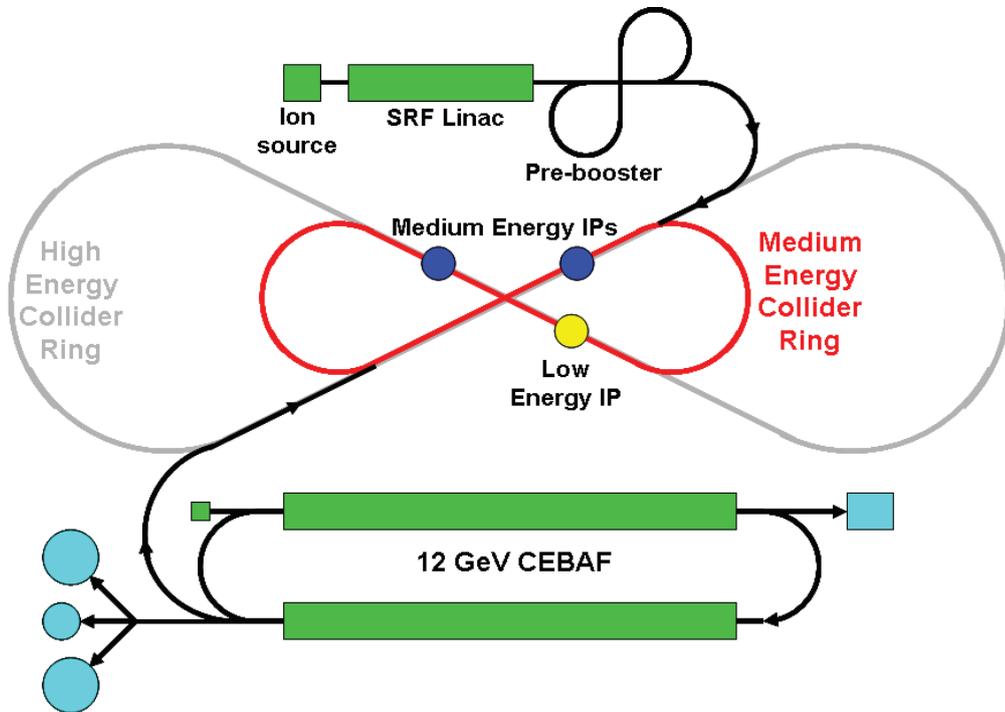
表 4.1: eRHIC第一阶段的预计性能参数列表[44]

eRHIC是基于布鲁克海文国家实验室相对论重离子对撞机RHIC并在其基础上进行改造而成的一种电子-离子对撞机（EIC），并以原先的强子设施及两个相交的超导环为基础，每个环的周长为3.8km，改造重置成本约为20亿美元。其产生的能量高达30GeV的极化电子束将与RHIC加速器产生的高速离子物质发生碰撞，比如最高能量为250Gev的极化质子、最高能量为100GeV/u且质心能量范围为45至175Gev的完全剥离铀离子（极化e-p）、32到110GeV的电子重离子碰撞。利用现有的超导磁体，最大束流能量至少可以提升10%。

如 4.1(a)所示，eRHIC的设计基于两个RHIC强子环和多通道能量回收直线加速器（Energy Recovery Linac, ERL）中的一个。使用ERL作为电子加速器可以产生 10^{33} - $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的亮度。将ERL定位在RHIC内部并在两个主要的直线加速器内修建加速腔，能量可以从第一阶段初始5-10GeV增加到最终30GeV。eRHIC将能够在多达三个相互作用区域内产生电子-强子碰撞。为了达到性能要



(a)



(b)

图 4.1: (a)eRHIC示意图; (b)MEIC示意图

求, eRHIC 将采用多种新技术。例如可以产生50mA电流的极化电子枪, 相干电子冷却器 (Coherent electron Cooling, CeC), 高电流多通道能量回收直线加速器, 及把计划He-3加速到高能量的新技术。为了应对这些技术挑战, BNL、JLab和MIT互相合作并且开展了一系列的研发计划。表 4.1中显示了eRHIC第一阶段的预计性能参数。

MEIC的核心部分是两个垂直堆叠的形如阿拉伯数字“8”的对撞环, 即高能对撞环和中能对撞环。如图 4.1(b)所示, 其中CEBAF电子环可以加速并存储3-11GeV电子或正电子, 而超导离子环可以加速并存储20-100GeV的质子或高达40GeV/u的被完全剥离的离子。而高能对撞环为MEIC未来升级计划的一部分, 注入到其中的的电子将会达到20GeV, 质子达到250GeV, 离子达到100GeV/u。在第一阶段设计中的中能对撞环中则包括三个对撞点位, 两个中能对撞点位和另外一个用于电子与低能离子对撞的点位。

表 4.2给出了能量为 $60 \times 5 \text{GeV}^2$ 的e-p碰撞的性能参数。其中对于一个接受区间完全覆盖的探测器来说, 亮度可以达到 $5.6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。为了达到这种理论上的高接受度, 那么探测器必须有足够大的空间。对于离子或质子来说, 从对撞点到探测器端盖的距离至少为7m, 而对于电子来说可以缩短到3.5m。因为在实际中探测器的接受度并不需要达到满接受度的程度, 将其适当降低, 探测器空间可以缩小到4.5m, 亮度可以进一步提高至 $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

		Proton		Electron
Beam energy	GeV	60		5
Collision frequency	GHz		0.75	
Particles per bunch	10^{10}	0.416		2.5
Beam current	A	0.5		3
Polarization	%	>70		80
RMS bunch length	mm	10		7.5
Normalized emit. (e_x/e_y)	mm	0.35/0.07		53.5/10.7
Horizontal beta-star	cm		10(4)	
Vertical beta-star	cm		2(0.8)	
Vert. beam-beam tune-shift		0.015		0.03
Laslett tune-shift		0.06		small
Detector space	m		$\pm 7(4.5)$	± 3.5
Luminosity per IP (10^{33})	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$		5.6(14.2)	

表 4.2: MEIC预计性能参数列表[44]

4.2 传统时间投影室的开关门机制

在对撞机内产生剧烈的重离子对撞后会产生大量的带电粒子，这些带电粒子与气体分子发生碰撞电离出大量的电子。但是并不是所有进入TPC场笼的带电粒子都有科学意义，比如没有与目标发生相互作用的对撞机束流粒子等。防止由这些不受欢迎的粒子电离出的电子进入探测器底部端盖进行无意义的雪崩是非常重要的，因为它们会加速阳极丝的老化过程。气体中的烃类成分或杂质会通过雪崩过程产生带负电的聚合物，这种聚合物会在阳极丝上沉积，从而可能导致增益的降低并使TPC的性能逐渐恶化[45]。雪崩还产生大量的阳离子，这些阳离子会以比电子慢得多的漂移速度向TPC的漂移区移动，如果任由其发展的话，这些阳离子最终会漂移到TPC场笼并扭曲其中的电场，从而降低探测器对带电粒子径迹的重建精度。

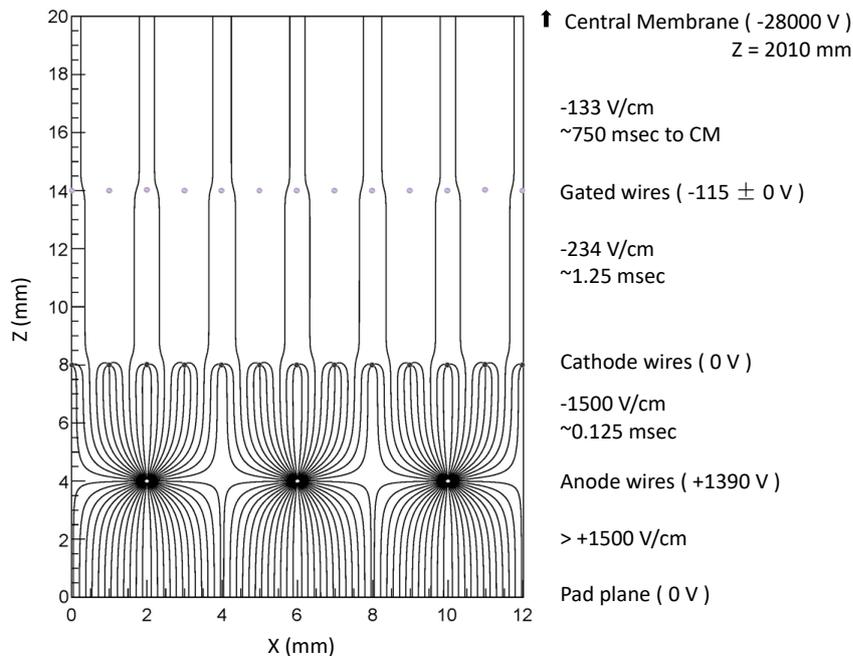


图 4.2: iTPC多丝正比室门极丝处于开门状态下的电场模拟及阳离子处于该电压配置下在各区域漂移速度的示意图[46]

以STAR TPC为例，在阴极丝上方加一层门极丝来把TPC的漂移区域与雪崩区域分开，通过周期性的对相邻的两根门极丝施加电性相反的电压来实现开关门。如图 4.2所示，门极丝处于开门状态，所有门极丝的电势都设置为一个公共电压-115V，以匹配场笼中的电场，使漂移电子的传输效率实现最大化。在该过程中门极丝几乎处于“隐形”状态，这些漂移电子穿过门极丝和阴极丝

从而到达阳极丝附近的雪崩区域。图 4.3展示了门极丝的关门状态，相邻门极丝被施加-115+75V和-115-75V的电压，电子漂移路线会终止于-115+75V 的门极丝，而阳极丝上电子的雪崩同时会产生大量正离子。这些阳离子被阳极丝排斥，一部分往阳极丝下方的pad上漂移，从而在pad上形成雪崩信号。另一部分被阴极丝（接地）吸收，未被吸收的剩余阳离子都最终被处于关门状态的处于-115-75V的门极丝吸收。这种开关门模式的优点是，开门配置和关门配置两种转换模式之间带来的电势差变化非常小，几乎对雪崩区域无影响，且在开关门过渡期间在pad上感应到的噪音信号十分小。在图 4.2及图 4.3所示的电场模拟示意图中，使用气体为P10（90%Ar+10%CH₄），阳极丝电压设置为1390V，阴极丝设置为0V，门极丝两种模式下的电压设置如上文所述，各个区域的场强及阳离子在各个区域的漂移时间均在图中标注。

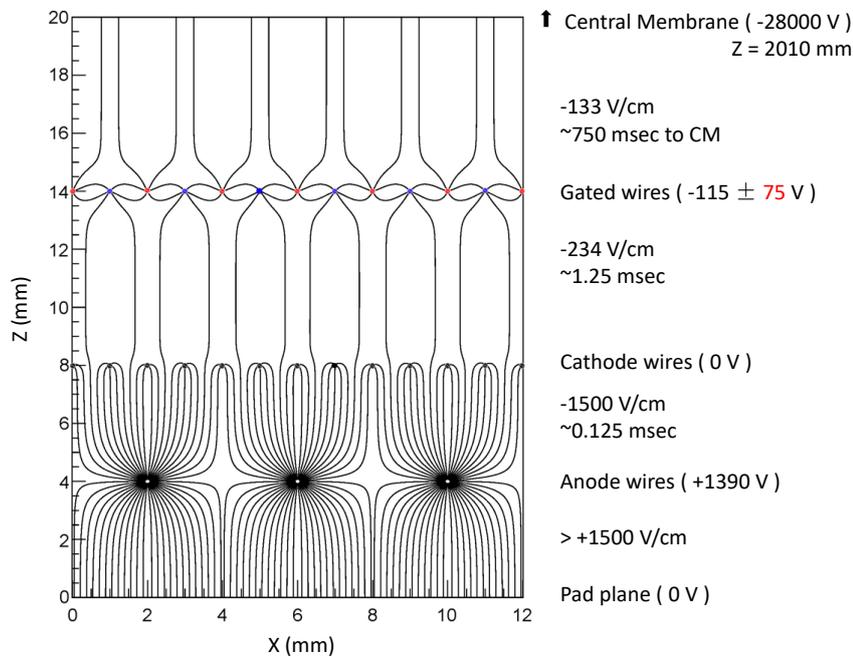


图 4.3: iTPC多丝正比室门极丝处于关门状态下的电场模拟及阳离子处于该电压配置下在各区域漂移速度的示意图[46]

在STAR TPC实际运行中，电子的漂移速度约为 5.4×10^6 cm/sec，阳离子的漂移速度约为 4.9×10^2 cm/sec。门极丝的开门状态和关门状态各自持续20%和80%的时间。STAR TPC 门极丝的开门触发与STAR事例触发器同步，它为每个碰撞事例打开一次。在门极丝打开后保持打开状态一段时间，然后关闭门极丝直到下一个事例。其中打开时间要大于电子从中心负高压平面漂移到端盖探测器（210cm）所需要的时间（约 $40 \mu\text{sec}$ ）。考虑到传统TPC关门的

延迟时间，这种工作机制会使探测器周期性的处于非工作状态。而未来EIC的亮度及碰撞率远远高于目前所有运行中的加速器，所以传统的基于MWPC的端盖探测器未来在EIC上实际应用的可能性极低，开发一种可连续读出的端盖探测器便成为关键。

4.3 微结构气体探测器在EIC上应用的可能性

对于EIC上应用的探测器设计最具挑战性的问题在于如何做到清晰的识别散射电子及提供它们的运动规律。通常来说它必须具有良好的径迹追踪功能，可以对径迹、动量、 dE/dx 进行精确测量及过滤掉混杂在电子中的光子，以消除光子带来的背景，因为它们可能会被误认为是电子，所以一定长度的漂移室是必须的。以上为比较通用的一般性要求，且精度越高越好。另外一个比较特殊的要求是新的EIC端盖探测器必须要有连续读出功能，所以老式的多丝正比室不再适用于新探测器，比如上一小节中提到的STAR TPC端盖部位上的MWPC，当门极丝处于关门状态时，整个端盖探测器处于闲置状态。而基于微结构气体探测器的端盖探测器可以很好的解决这个问题。同时对于阳离子回流的抑制也是一个比较重要的问题。基于微结构气体探测器的端盖探测器虽然无法像门极丝那样理论上可以将阳离子全部吸收，有部分阳离子会漂移到漂移区，但是通过优化微结构气体探测器的配置（比如使用多层微结构气体探测器，并使其处于交叠状态，或者调节微结构气体探测器的电场配置），可以使微结构气体探测器抑制阳离子的能力发挥到极致，后期更是可以通过各种模拟的方法来优化和校准空间电场从而校准重建出来的粒子径迹。

4.4 小结

EIC作为下一代QCD前沿科学的大科学装置，美国布鲁克海文国家实验室的RHIC以及杰斐逊国家实验室的CEBAF在过去的十几年中开始在原有的基础上进行改造升级，国内兰州HIRFL也开始了相关的研发。而对于未来可以在EIC上应用的端盖探测器，因为EIC的高亮度和高反应率，所以新探测器在保证探测精度的基础上还必须具有连续读出功能，所以传统的MWPC不再适用，而基于MPGDs的探测器便成为一个比较好的选择。在后面的章节中将具体介绍由作者研发的一种基于气体电子倍增器及阳极丝面的新型时间投影室结构。

第五章 基于气体电子倍增器和阳极丝面的时间投影室设计 及原型样机研制

EIC对下一代探测器提出了更高的技术要求，以目前的多丝正比室设计是远远无法满足其要求的，门极丝仍然需要通过开关门来抑制阳离子回流等，这些都会影响到探测器的读出效率。未来的时间投影室必须具有连续读出功能。本章将首先对目前应用较广的各类气体电子倍增器进行介绍，然后将具体对一种基于气体电子倍增器及阳极丝面的新型时间投影室的设计、原型样机的制作、硬件系统的搭建过程等方面逐渐展开陈述。

5.1 微结构气体探测器 (MPGDs)

气体探测器是高能物理试验中最早发展起来的探测设备，如今已经成为大型高能物理实验中不可或缺的测量装置。早期的气体探测器有G-M计数管，云室，气泡室，电离室，正比计数器等，这些探测器的发展促成了许多重要的发现，如G-M计数器早期对宇宙射线的测量，云室中对正电子及 μ 子的发现和测量等，这些成为之后各类气体探测器发展的基础。1968年，乔治·夏帕克等物理学家发明了多丝正比室，之后又将其改进为漂移室[47]。它可以稳定的长时间工作，对径迹的空间定位达到亚毫米量级。因为它的诸多优越性，使之迅速取代了气泡室和火花室等探测设备，成为20世纪70年代以后高能物理实验中主流的探测设备。

随着对撞机技术的进一步发展，各种强束流，高亮度的实验对探测器提出了新要求。多丝正比室由于门极丝开关门机制的存在大大限制了探测器的读出效率。为了适应下一代高能物理大型实验的技术要求，微结构气体探测器 (Micro-Pattern Gas Detectors, MPGDs) 应运而生。目前发展较为成熟的微结构气体探测器有微条气体室 (Micro-Strip Gas Chamber, MSGC)，微网气体结构探测器 (Micro-Mesh gaseous structure, MicroMegas) 以及气体电子倍增器 (Gas Electron Multiplier, GEM) 等，这些探测器具有结构简单，高空间分辨率，高计数率，强兼容性等优势，已经在核科学，医学，生命科学及高能物理等领域得到了越来越多的关注和应用[48]。

5.1.1 气体电子倍增器 (GEM)

气体电子倍增器 (Gas Electron Multiplier, GEM) 的概念在1997年由物理学家Fabio Sauli率先提出[49, 50]。在众多微结构气体探测器中，它是结构最简

单、应用最广泛的一种。如图 5.1 及图 5.2 所示，标准GEM由中间的一层聚合物薄（kapton）膜外加上下层金属（铜）镀层构成，上面密布着规格统一的双锥型孔。其中kapton膜厚度为 $50\mu\text{m}$ ，上下两层镀分别厚 $5\mu\text{m}$ ，孔的内外径分别为 $50\mu\text{m}$ 和 $70\mu\text{m}$ ，孔间距为 $140\mu\text{m}$ 。早期的制作工艺需要经过掩膜、曝光、显影、去胶及化学蚀刻，现在则多采用光刻技术来制作，最后可以得到呈正六边形排布的尺寸统一的孔。

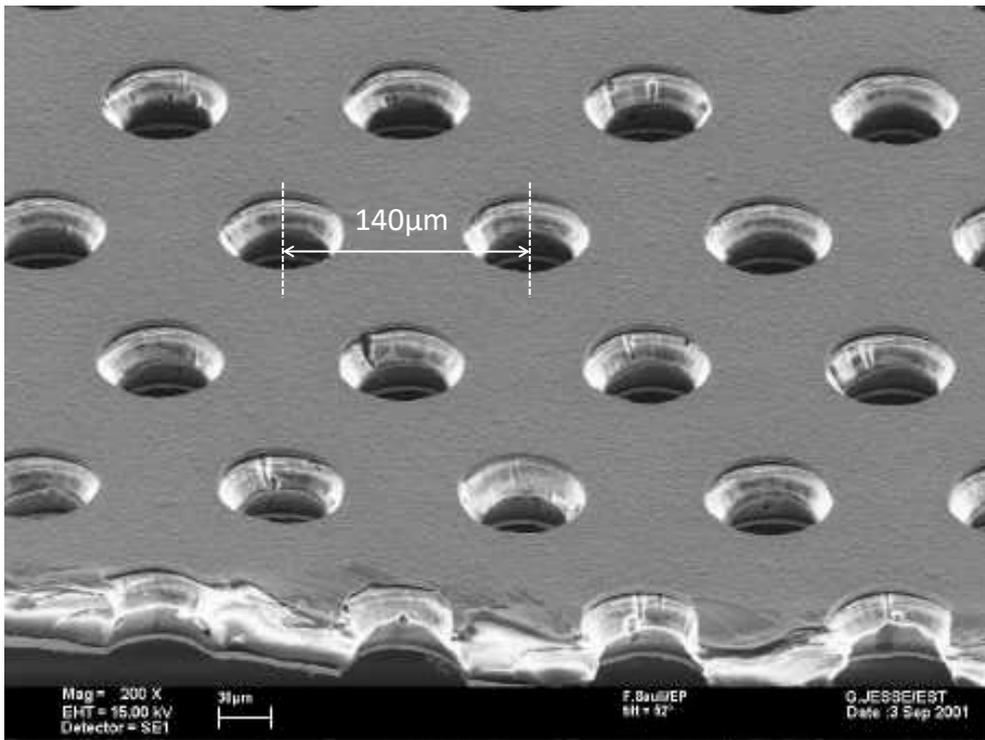


图 5.1: 显微镜下的标准GEM实物图

GEM在工作时需要在上下两层金属覆层上施加不同的电压以形成压差，压差通常控制在200-400V之间（压差过低则无法发生电子雪崩现象，过高则容易引起GEM的打火放电从而降低其使用寿命），图 5.3 显示了GEM处于工作状态下其孔内外电场线分布。原初电子在GEM上方的漂移电场的作用下会有一定几率击中GEM的上层金属直接被吸收掉或者进入孔内。进入孔内的电子会在孔内电场线最密集的区域与气体分子发生剧烈碰撞从而发生雪崩，产生大量的次级电子-阳离子对。GEM的工作压差越大则孔内的电场线越密集，电子雪崩放大的倍数就越高。经过雪崩放大后的电子会继续穿过孔继续向下一级传输，或被pad直接读出，或进入下一级倍增器继续放大。

不同于多丝正比室的阳极丝，GEM探测器中电子的雪崩放大与信号的读出其两者是相互独立存在的，信号通过GEM下方的pad或strip阵列读出。单

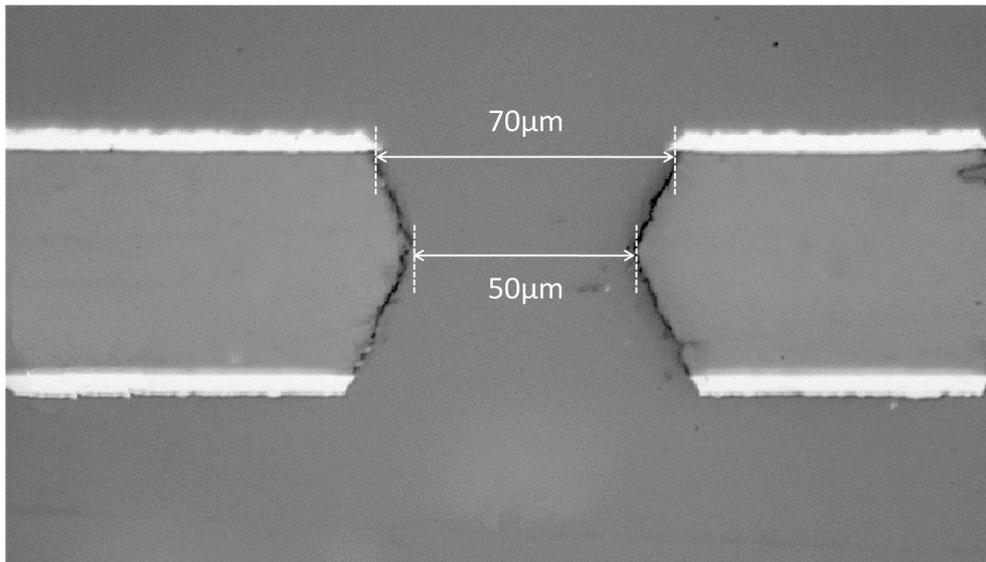


图 5.2: 标准GEM单个孔实物剖面图

层GEM的增益并不高（通常为 10^1 - 10^3 ），通常使用双层GEM 或者三层GEM叠加的方式进行联级放大，也可以搭配其他微结构气体探测器或者阳极丝等。其灵活的配置及稳定的性能，决定了它可以根据不同的设计方案灵活来搭建探测器。比如ALICE探测器已经用4层GEM替换了老旧的多丝正比室[51, 52]。MicroMegas+GEM的组合也被证明了具有一定的可行性[53]。

5.1.2 厚型气体电子倍增器（THGEM）

气体电子倍增器在过去的几十年中得到了大力发展。作为气体电子倍增器的衍生后续产品，厚型气体电子倍增器（Thick Gas Electron Multiplier, THGEM）由于其生产工艺简单且耐用程度较高，迅速成为了标准气体电子倍增器的替代物之一。THGEM的孔结构类似于GEM，但是其尺寸大约有5至20倍的扩展，其中包括孔距及孔径等。其制作工艺不同于GEM的光刻或者化学腐蚀，由于它的尺寸已经经过了放大，所有通过采用亚毫米精度的数控加工中心对其进行机械钻孔便可以达到要求[54]。THGEM所采用的绝缘层并不是kapton，而是很薄的印刷电路板，所以它在实际应用中不需要另外制作边框或其他固定物，印刷电路板的上下两面全部为铜皮，控制好钻孔的深度和位置，钻孔完毕后再对孔的边缘部分进行铜蚀刻。

THGEM的工作原理与标准GEM基本相同，在上下两层铜皮间施加一个电压差，以便在孔内形成一个强大的电场。这种特殊的电场负责有效的将原初电子聚焦到孔中，并通过气体雪崩使其倍增。在收集电子方面，THGEM 也有它

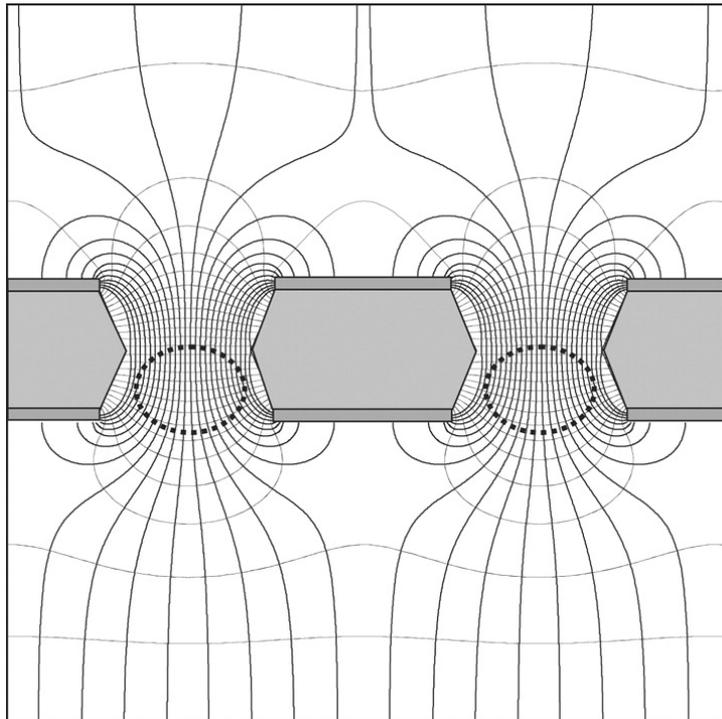


图 5.3: GEM孔内电场线分布示意图

独到的优势，因为当原初电子接近它时，它的孔径大于电子的横向扩散范围，所以对电子的高效收集和传输保证了它可以在联级配置中进行使用。这样每张THGEM可以在较低的工作电压下工作，从而保证了它的稳定性和耐用性。THGEM可以有效的检测辐射电子，无论是沉积在气体中还是从固体转换器发射出来。前者对粒子跟踪、X射线成像等具有重要意义，后者在单光子和中子成像中有重要应用。当然THGEM也有它的劣势，相比较标准GEM微米级别的位置分辨能力，THGEM只能达到亚毫米级别，但是该精度在探测中子的过程中已经足够。由于THGEM中间的绝缘层厚度相比标准GEM厚很多，导致它的工作压差也大了很多，通常的工作电压保持在1000V至2000V，单层THGEM的有效增益可以达到 10^3 至 10^4 。双层THGEM联级使用更是可以获得 10^5 左右的有效增益[55]。

5.1.3 玻璃型气体电子倍增器（G-GEM）

作为标准GEM的另一个衍生物，玻璃型气体电子倍增器（Glass Gas Electron Multiplier, G-GEM）目前吸引了众多的专家和学者的目光。它所用到的光蚀刻玻璃底材为铈、银、锂铝硅酸盐等合成的一种新型玻璃。在紫外光照射下，铈被氧化并释放出一个电子。在第一步退火过程中，释放的电子减少了玻

璃材料中带正电的金属离子。中性金属原子具有很高的迁移率，它们在基底内移动形成金属团簇。在第二次退火过程中，在更高的温度下，这些金属团簇使周围的玻璃结晶，然后晶体可以很容易地被氟化氢腐蚀形而形成小孔[56]。最后把经过处理的玻璃底材上下两面用铜皮覆盖作为其电极。使用光敏玻璃作为基材的另一个优点是其与光刻技术兼容性较好，后期可以在玻璃上光刻出非常精细的电极图案。

G-GEM有很好的潜力用作密封式探测器，因为玻璃不是放气型材料，材料放气会降低密封气体的纯度和探测器的性能。此外，玻璃基材的低电阻率可防止不必要的电荷积累（充电），从而导致增益变化。如果G-GEM具有足够的厚度，即使大面积使用，它也将具有足够的机械强度来支撑自身，并且G-GEM不会承受弯曲问题。这种自我支持能力是它在应用时不需要任何张紧工具[57]。

G-GEM探测器可用于高灵敏度便携式X射线或 β 射线成像设备。此外，G-GEM的无气体特性使探测器能够长期气封操作，因此，由于不再需要储气罐对其进行充气及排气进行气体循环，一次充气后密封便可以实现便携式成像设备。

5.2 基于GEM及阳极丝面的新型时间投影室的设计思路

在如今的很多大型气体探测器中，其时间投影室的端盖探测器仍然是多丝正比室使用居多，通过门极丝的开关门来防止阳离子回流而引起的空间电场扭曲。在门极丝处于开门状态时，原初电子可以进入端盖探测器进行雪崩放大读出。当门极丝关门时，雪崩产生的阳离子一部分被阴极丝吸收掉，剩余的部分则被门极丝吸收掉。在这种运行机制下，虽然对阳离子回流的抑制可以达到 10^{-5} 量级，但是它同时也会影响读出效率，导致探测器有一个周期性的死时间段无法进行读出。未来EIC高亮度对撞机必然要求探测器具备连续读出的功能，所以现今传统多丝正比室的工作机制已经无法满足下一代探测器的技术要求。

近年来，随着各种微结构气体探测器的蓬勃发展，涌现出很多下一代气体探测器的雏形。GEM因为其独特的电极结构，不但可以有效的抑制阳离子回流，而且无需再像门极丝那样开关门，即可以实现连续读出使探测器的死时间最小化。在实际应用中大多采用联级的方式进行组合，比如ALICE试验中的4层GEM叠加，其增益可以被控制在2000左右，IBF可以被抑制到 $<0.7\%$ 左右，并且能量分辨率保持在10%左右。基于此，作者设想是否可以把传统丝室的优点与微结构气体探测器比如GEM的优点相结合。丝室的优点是其阳极丝可以耐受较高的工作电压同时提供较稳定的增益，且增益容易调节（通过调节阳极丝工作电压即可），同时其对气体环境要求较低且不易打火。而GEM因为其

独特的电极结构无需任何开关门机制便可以抑制阳离子回流。因为GEM耐压性不高，所以增益计划由阳极丝来主要提供，两层GEM叠加后只需要在较低的电压下工作提供辅助放大并使电子流畅的传输即可。所以对于新型时间投影室的结构，作者最终在iTPC小型样机的基础上拆卸掉阴极丝和门极丝，保留阳极丝并在其上方合适的位置叠放两层GEM，这样两者的优势得以结合。

5.3 原型样机的搭建

探测器样机的结构如图 5.4所示，它由顶盖，漂移平面，两层GEM（原型样机中使用的标准GEM来自美国BNL实验室的宇宙线测试系统[58]），阳极丝框，pad平面和底座组成。整体尺寸为45.5cm×45.5cm×6.5cm。通过橡胶O型圈及周围的螺栓来保证气密性的完好。

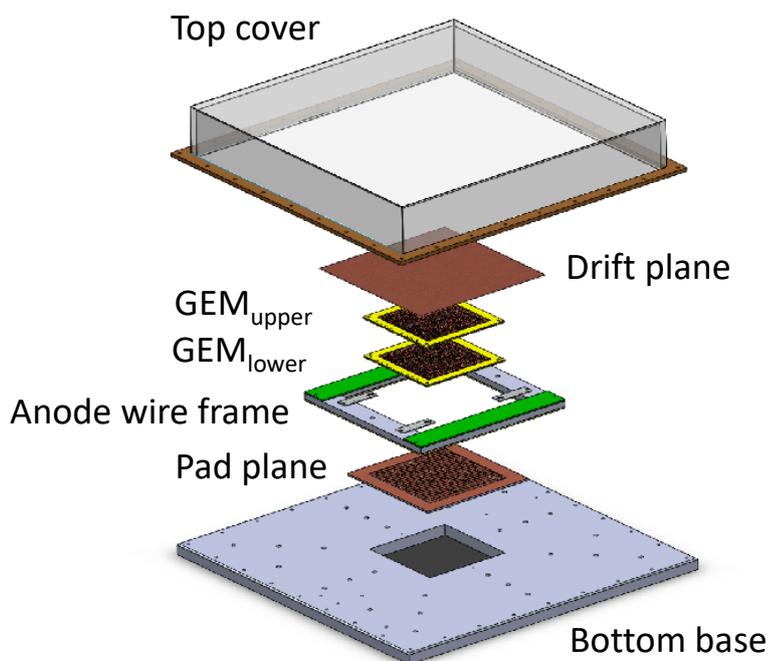


图 5.4: 原型样机的三维结构示意图

在铝制底座上方，使用双组份环氧树脂胶将一块10cm×10cm的pad平面贴合在上面，pad的尺寸为15.5mm×5.5mm，相邻pad的间隙为0.5mm。阳极丝丝框架共绕有28根镀金钨丝，丝张力为51g，丝间距为4mm。两层10cm×10cm的标准GEM（孔间距140 μ m，孔内外径分别为50 μ m和70 μ m，kapton厚度50 μ m，上下两层镀铜厚度都为5 μ m）置于阳极丝丝框的上方。漂移极板为10cm×10cm且

厚度 $50\mu\text{m}$ 的铜板。顶盖由有机玻璃拼合而成，在拼接的缝隙处全部涂有硅胶来加强密封性。然后其上在覆盖一层铜皮以屏蔽各种电磁干扰。内部充满P10（90%Ar+10%CH₄）作为工作气体，混气仪的精度可以达到0.1%。

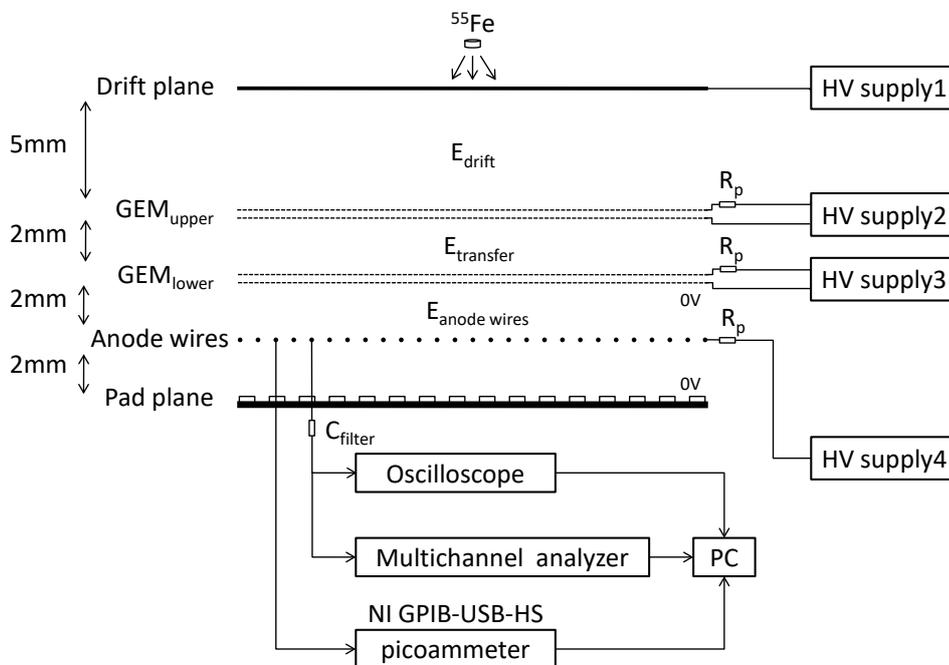


图 5.5: 基于⁵⁵Fe的探测器样机及硬件测试系统布局图

在电场设置方面， E_{drift} 为漂移极板与上层GEM上表面之间的电场强度，它主要为经过电离后的次级电子提供漂移电场使其顺利进入GEM进行放大。 E_{transfer} 为两层GEM之间的电场强度，它可以使经过第一层GEM放大后的电子顺利传输到第二层GEM。 $E_{\text{anode wires}}$ 为阳极丝与下层GEM下表面之间的电场强度，值得一提的是，这里下层GEM的下表面需要接地（电势0V），只有这样才能通过控制阳极丝电压来实现对探测器有效增益的调节（如果调节阳极丝电压的同时下层GEM的下表面电压也变化的话，就会形成等效电压的升高或降低，从而影响阳极丝的增益）。

pad平面、阳极丝面、两层GEM、漂移平面之间各自的距离如图 5.5所示。使用两个CAEN N1471高压模块对其进行6路单独供电。每一层GEM都各通过一个保护电阻 R_p （ $10\text{M}\Omega$ ）来防止偶然的电流过大导致烧坏其中间的绝缘层[59]。脉冲信号通过阳极丝读出，过滤电容（ 1.3nF ）连接在读出电子学和阳极丝之间，用以过滤信号。GEM通过上下两层厚度为1mm的PCB边框固定后可以自然张紧，将双层GEM按照特殊的方式对齐后，通过阳极丝边框四个角落

上的支撑座将其固定在丝框的正上方。

由于GEM孔的排列规律呈特殊的正六边形，通过显微镜的帮助，作者分别尝试了两种交叠方式（这里及下文中提到的交叠模式为两层GEM孔不对孔的叠加状态，即双层孔正好错开。而非交叠模式为两层GEM孔对孔的叠加状态，即孔正好对齐）。第一种方法在理论上可以做到双层孔的100%交叠。方法是固定一层GEM的位置，移动另一层GEM的位置使其相对于固定的GEM向上或者向下移动 $70\mu\text{m}$ ，如图 5.6所示，图中的亮点是上层GEM的孔，模糊暗淡的点是下层GEM的孔，两层GEM的孔完美错开，在这种情形下双层GEM抑制阳离子的能力达到最佳。但是这种方法的弊端同样明显，双层GEM虽然在显微镜下达到了完美的交叠状态，但是在之后的探测器装配过程中则容易受到装配精度的影响，最后安装在探测器上的两层GEM的孔最坏的情况可能刚好达到非交叠状态，而且双层GEM的摆放角度如果在装配过程中稍稍错开一定角度，在这种排列规则下会导致阳离子回流比率的周期性变化，使整个探测器的对阳离子回流的抑制能力处于非均匀状态，所以该交叠方式只用来模拟理论上完美交叠下的探测器阳离子回流抑制能力，而在实验中应用的为第二种交叠方式。

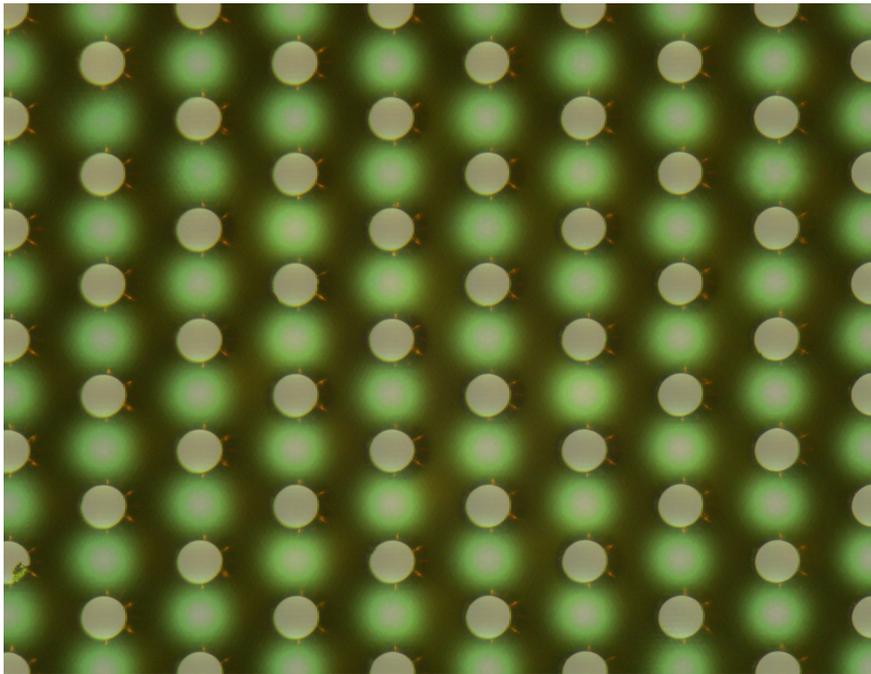


图 5.6: 通过使上层GEM平移 $70\mu\text{m}$ 来实现的双层GEM交叠状态（固定其中一层GEM）

对于第二种交叠方法，固定其中一层GEM的位置，以GEM的中心为轴使另一层GEM转动 90° ，由于整张GEM呈正方形，而且GEM孔的正六边形排列规

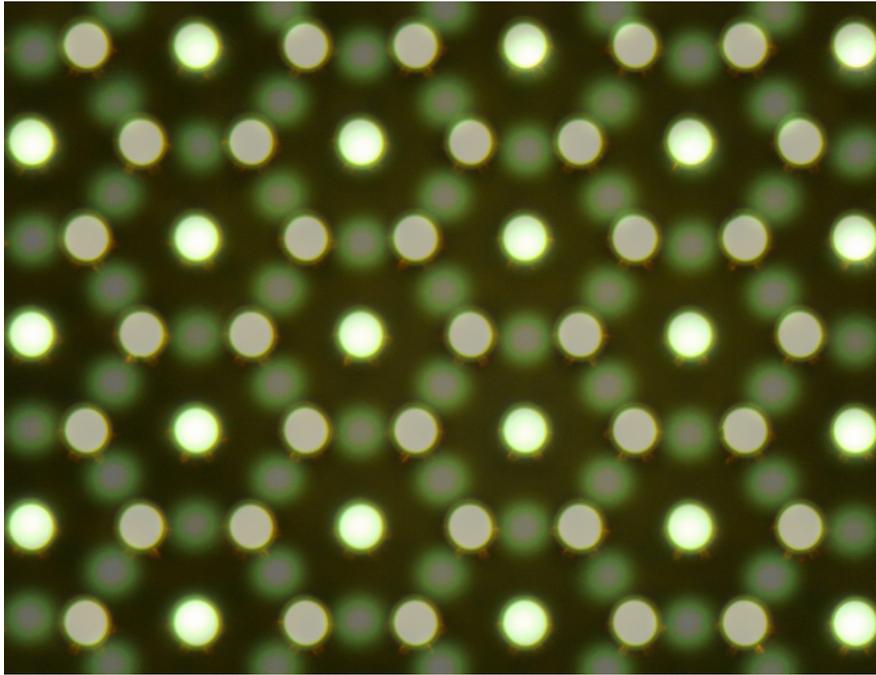


图 5.7: 通过使上层GEM旋转90°来实现的双层GEM交叠状态（固定其中一层GEM）

律，这种交叠方式同样可以使双层孔达到交叠状态。如图 5.7所示，图中最亮的点是旋转后双层孔对齐后的位置，普通亮度的点为上层GEM的孔，模糊暗淡的点为下层GEM的孔。与第一种方法不同的是，这种方法不依赖于探测器的装配精度，由于该方法双层孔特殊的排列规律，即使双层膜转动角度离90°稍有偏差或者一层GEM相对于另一层GEM稍有位移，探测器对阳离子回流抑制能力也始终处于均匀状态，所以该方法也在随后的实验环节得到应用。

5.4 探测器测试系统的搭建

如图 5.8所示，为了适应探测器的不同增益范围，分别为其搭建了两套电子学读出系统。当增益较大 (>10000) 时，使用示波器 (Tektronix MDO4054B-3) 搭配LabVIEW来进行阳极丝或者pad上脉冲信号的捕捉。示波器的特性是对小信号不敏感，但是其测量上限可以认为是无穷大 (相对于mV量级的电信号来说)。对于低增益 (<10000)，则使用多道脉冲分析仪 (Amptek 8000D) 外加前置放大器 (A225) 和主放大器 (A206) 来将脉冲信号数字化。对于电流的采集使用的是皮安表 (Keithley 6482, 分辨率为1fA)，通过一根GPIB-USB-HS线缆可以实现对电流数据的实时监控与采集。以上电子学搭建系统搭建完毕后

开始对探测器充入P10气体，并将温度保持在25°C，将气压控制在高于标准大气压2mbar（此环境设置沿用了STAR-TPC的设置，该环境设置长期运行超过20年，已经证明了其可靠性和稳定性）。

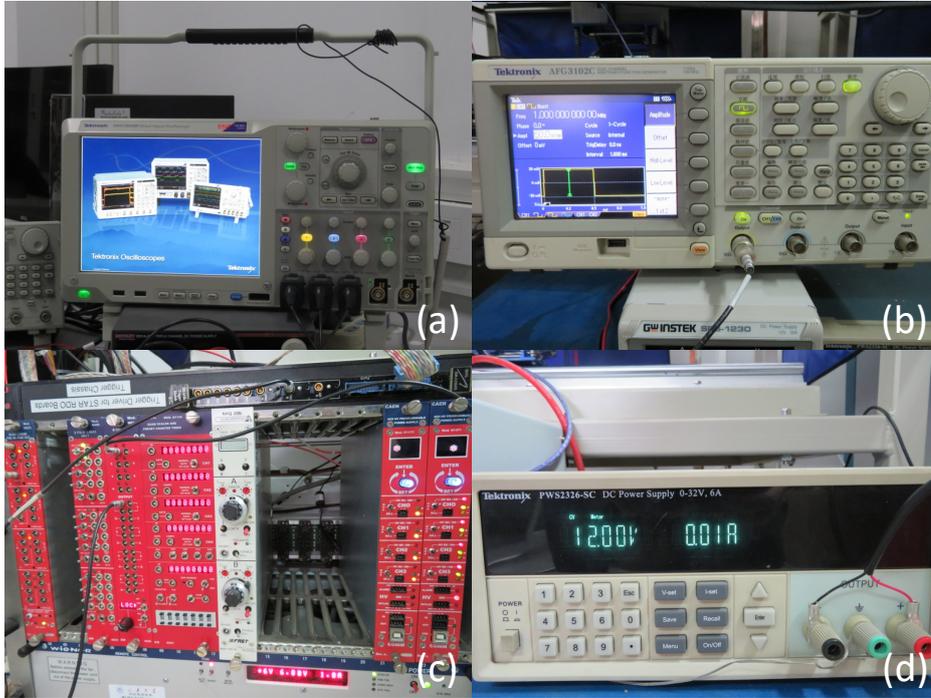


图 5.8: 电子学辅助仪器 (a)示波器；(b)信号发生器；(c)NIM机箱；(d)低压电源

探测器电压设置方面的思路是由阳极线提供大部分增益，GEM仅预放大信号，这使得GEM可以在相对低的电压下工作并降低它们打火放电的概率。阳极丝通常的工作电压在1000V左右，在1120V时增益可以达到2400左右。对于GEM的电压设置 ΔV_{GEM} ($\Delta V_{\text{GEM}_{\text{upper}}} = \Delta V_{\text{GEM}_{\text{lower}}}$)，由于放电信号的幅度远高于普通信号的幅度，为了检测GEM上的放电，调整示波器触发阈值（大约100mV左右）以过滤掉普通信号并触发具有更高幅度的放电信号。然后使用LabVIEW记录超过阈值的信号。当其低于300V时，打火的几率明显降低，当 ΔV_{GEM} 被设置在255V时在2小时的检测时间内没有发现任何打火的现象[60]。所以在后面的模拟和试验中， ΔV_{GEM} 被固定在255V，当需要调节增益的时候，可以通过调整阳极丝上的电压（940-1160V）来控制探测器的增益。对于各区域电场（比如漂移区场强 E_{drift} 和两层GEM之间的传输区场强 E_{transfer} ）的设置，则需要借助下一张的Garfield++模拟来提供参考。

5.4.1 多道脉冲分析仪测试系统

在时间投影室的实际应用中，如STAR探测器和ALICE探测器，其增益通常被控制在2500左右，在这个信号幅度量级上，多道脉冲分析仪的应用是最广泛的，而示波器的应用不是很多，它主要用来测量高增益 (>10000)，其测试原理将在第八章结合实验进行介绍。

多道脉冲分析仪 (MultiChannel Analyser, MCA) 测试系统主要包括三大部分：前置放大器、主放大器及多道脉冲分析仪。前置放大器为电荷灵敏放大器，所使用的型号为Amptek A225，输出信号的幅值正比于输入电荷，具有低噪音和高分辨率的优点。主放大器使用的型号为Amptek A206，可根据所需要的输出信号幅值大小作为选用设备。多道脉冲分析仪使用的型号为Amptek MCA8000D，工作电压 $+4V\sim+5.5V$ ，信号量程 $0\sim10V$ ，最高精度可达8192道。其中A225只有芯片大小，需要将其集成在配套的运算主板PC25上才能使用。除此之外，如图 5.8所示，Tektronix混合域示波器、Tektronix AFG3152C信号发生器、NIM机箱 (包括CEAN N1471高压模块、CEAN N405信号逻辑模块、CEAN N625信号输入输出转换模块、CEAN N844低阈值鉴别器、CEAN N1145计数器/计时器)、Tektronix PWS2326-SC低压电源等电子学辅助仪器也在该测试中得到广泛使用。

5.4.2 MCA系统刻度

多道脉冲分析仪是一种测量脉冲信号幅度分布的仪器。其原理为:它将整个被分析的幅度范围划分成若干个相等的区间 (区间的大小称为道宽，区间的数目称为道数，道数越高其能量分辨率越高)，然后把脉冲信号按幅值的大小进行分类并记录每类信号的数目。

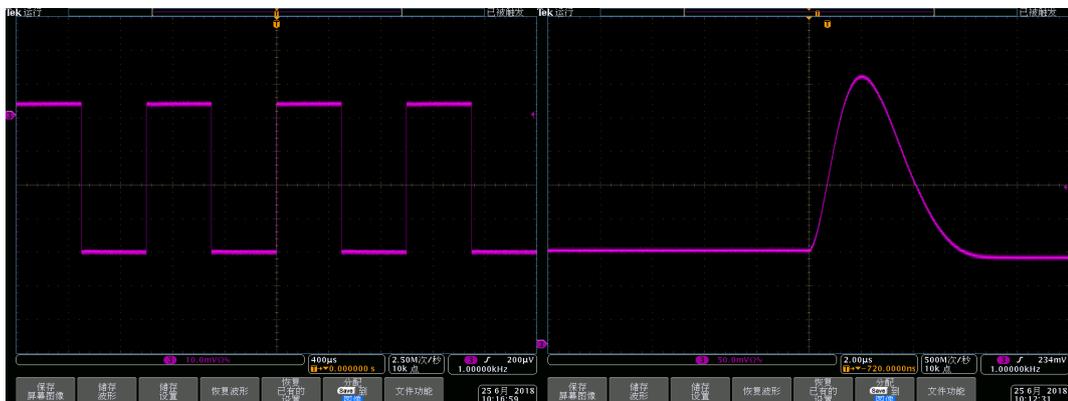


图 5.9: 信号发生器产生的方波及经过前置放大器放大成型后的波形显示

脉冲信号的幅值跟多道脉冲分析仪的channel成正比，幅值越高其所在的channel就越高。但是channel的大小代表多少电量是未知的。所以为了后面的增益测试，需要对整套测试系统进行刻度，确定输入电荷量 Q 与道址 CH 的对应关系。其具体的刻度流程为：首先用信号发生器周期性的产生1000Hz，占空比50%，低电平基准为0V的方波，然后将其输入到PC25主板上（该主板自带刻度电容，大小为2pF），经过刻度电容后，会周期性的产生一个大小为 $Q = CV$ 的脉冲信号。然后将该脉冲信号输入到前置放大器A225（或前置放大器A225+主放大器A206）中进行放大成型。图 5.9显示了信号发生器产生的方波及经过前置放大器放大成型后的波形。最后再把该信号输入到多道脉冲分析仪中进行分析。接下来调整信号发生器方波的幅度就可以得到不同的输出电荷量 Q ，重复上述过程，最终可以得到多组channel与输入电荷量 Q 的对应关系，如图 5.10 所示。通过拟合可以得到两者的线性关系（注意公式中 Q 的单位为pC，即 $10^{-12}C$ ）。对于单独的A225:

$$CH = 5168Q - 12.27 \quad (5.1)$$

对于A225+A206:

$$CH = 19030Q - 32.49 \quad (5.2)$$

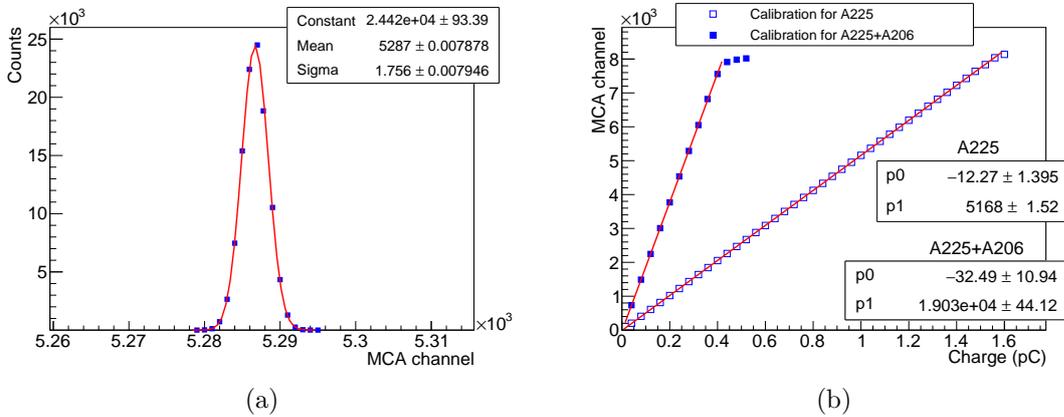


图 5.10: (a)信号发生器产生140mV方波条件下A225+A206对应的MCA通道；(b)A225及A225+A206输入电量与对应MCA通道的线性关系

5.4.3 气体混合系统

探测器内的工作气体则沿用了STAR TPC的P10气体。P10可以提供较高的增益，具有良好的正比性，计数率高且经过20多年的长期工作阳极丝上没有发现明显的老化迹象。对于P10气体的工作原理，其中Ar有较高的比电离和较低

的价格[61]，但是单一的Ar存在一个较高的激发态（11.6eV），在雪崩过程中此激发态在退激时辐射出的光子会在探测器阴极丝表面激发出电子从而产生新的雪崩。此外，Ar离子还可能会漂移到阴极丝表面与其上的一个电子进行中和而释放出一个光子或一个电子。以上两种情况都会引起探测器的永久放电[62]。而CH₄可以大量吸收Ar辐射出来的光子，因此在Ar中加入少量CH₄可以抑制探测器的永久放电，使其发生雪崩后迅速恢复。所以其中的CH₄也被称为淬灭气体[63]。

对于P10气体的混合，如图 5.11所示，气体混合仪混气精度可以达到0.1%。使用时通过控制储气罐内Ar与CH₄的气体流量来控制其比例，混合好后的P10会储存在另一个单独的储气罐中供随时使用。气体经过过滤装置进入测试箱，气体排出则要先经过一个洗气瓶，内部装有固定液面高度的硅油，用以维持测试箱内部气压（高于标准大气压2mbar）[64, 65]。

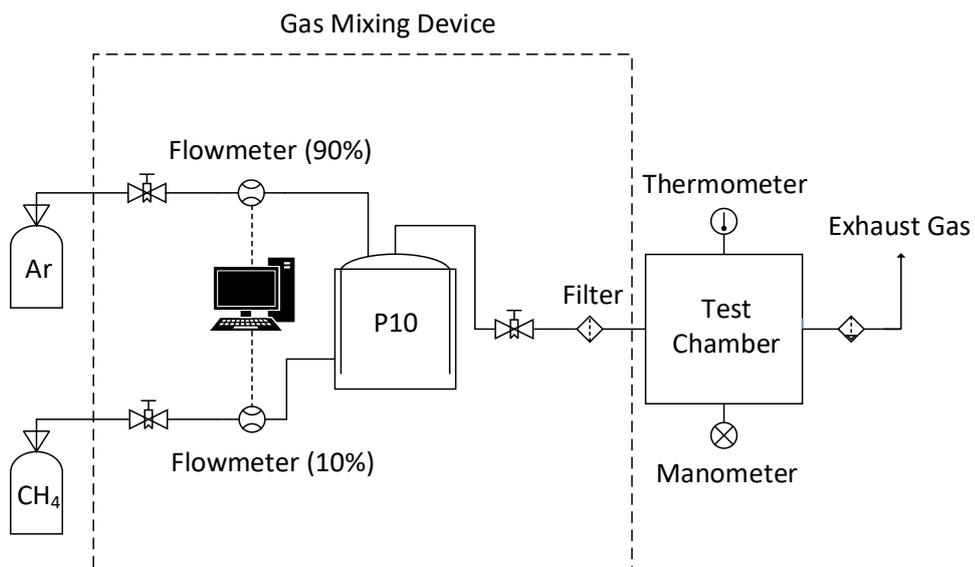


图 5.11: P10气体的混合、过滤、使用、排放过程示意图

5.4.4 对于温度和压强的控制

测试箱内所需要达到的温度为25°C。如图 5.12所示，对于温度的监控主要通过通过Arduino-BMP180模块来实现，其温度采样精度可以达到0.1°C，并通过获取到的温度采样数据调节实验室内制冷机来间接调节测试箱内的温度。而

对于测试箱内压差的监控使用的是瑞士生产的Huba 699系列的微型压差变送器，其精度可以达到0.02mbar。开通混气系统后结合采集到的压差数据调节气体流速使测试箱内的压强达到高于标准大气压2mbar。

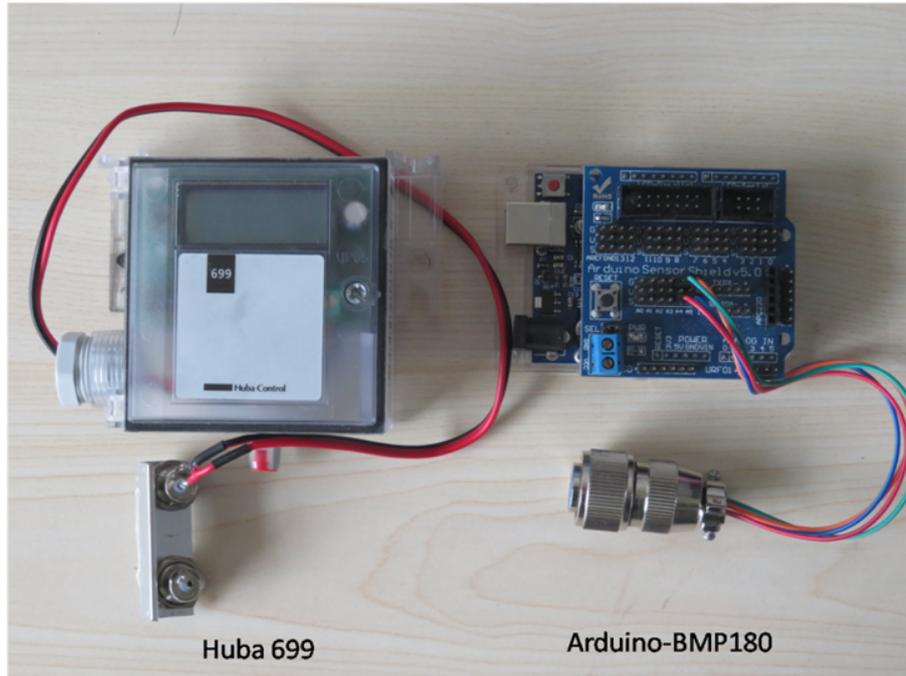


图 5.12: 温度控制模块Arduino-BMP180及微型压差变送器Huba 699实物图

对于原型样机的测试并不像第三章中对iTPC的批量性能测试（持续4小时以上），批量测试过程中在如此长的时间内温度和压强难免会出现明显的涨落，众所周知温度和压强会对等探测器的性能测试造成影响（比如增益），故需要做温度和压强修正。但是对于阳离子回流比率的测试中不涉及批量测试，无论对增益的测试还是对电流的测试都可以在短时间内完成（10分钟内），所以每次测试预先调节好温度和压强，期间保证所有数据取自一个平稳的温度及压强环境。如图 5.13 所示，在10分钟内温度保持在25°C左右，压强保持在高于标准大气压2mbar左右，且处于一个平稳状态，并未出现大的涨落。

5.4.5 系统屏蔽

探测器和测试系统均需要良好的屏蔽来防止任何可能的电磁干扰。探测器上层有机玻璃覆盖有一层铜皮，并且和铝制底座一同接地。皮安表则被屏蔽在一个铜皮箱内，由于所测电流为nA甚至pA量级，所以对皮安表的屏蔽好坏直接决定了测试结果的准确性。传输电缆则都配有电磁屏蔽环，以确保数据在传

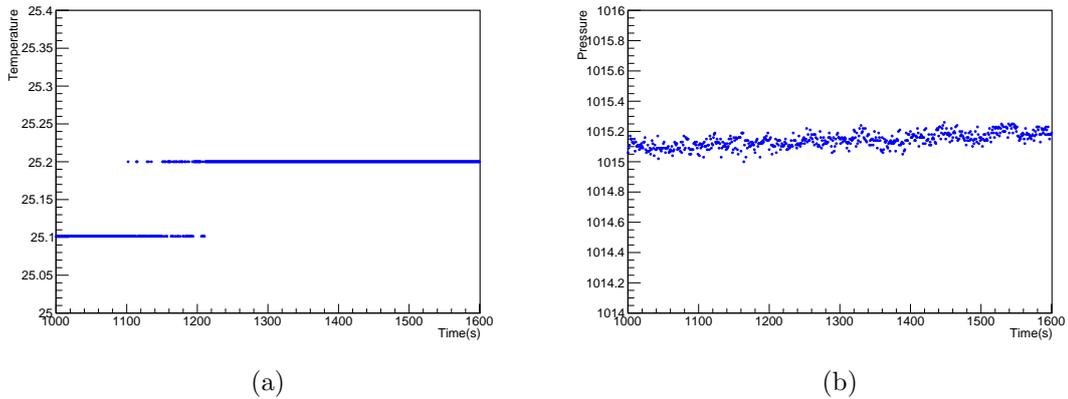


图 5.13: (a)对探测器内温度的监控（10分钟）；(b)对探测器内压强的监控（10分钟）

输过程中不受任何电磁干扰的影响。经过上述整套屏蔽措施，整个系统所受到的外界干扰被降至尽可能小。

5.5 小结

考虑到未来加速器对探测器的更高要求，显然以目前多丝正比室的设计是远远无法满足其要求的，门极丝仍然需要通过开关门来抑制阳离子回流等，这些都会影响到探测器的读出效率。未来的探测器必须具有连续读出功能。基于此，作者创新性的设计并搭建了一套气体电子倍增器搭配阳极丝面的全新时间投影室结构，将阳极丝的优势与GEM的优势相结合。其中阳极丝丝框的绕制用到了此前介绍的绕丝系统和丝张力测试系统。CERN生产的标准GEM则由BNL实验室提供。探测器搭建完毕后，其余的硬件系统如多道脉冲分析仪测试系统、混气系统、温度及压强监控系统也同时建立起来。由于对这种全新的时间投影室配置缺乏经验，整个测试平台搭建完毕后并没有直接测试，而是通过接下来的模拟环节来提前对该探测器的性能掌握更多的信息。

第六章 基于APDL的时间投影室单元建模

在实验展开之前，通过Garfield++模拟可以进一步探索并验证新型时间投影室预期方案的可行性。要进行模拟首先需要建模，对于建模软件则选用了具有有限元分析功能的APDL。根据探测器各部件的实际尺寸通过APDL代码将其实体化，建模完毕后通过有限元分析法进行分析求解，它把整个分析对象分成微小的元素，一个元素带有几个节点，这些节点便是用来计算电位的点。越是精细则要求划分的网格越多，节点的数量就越多，所以网格的划分精细度应该控制在一定范围内。通过求解最终可以得到整个3D模型单元的电势分布，将其导入到Garfield++中通过镜像命令将其扩展到任何尺寸。本章将从最简单的单层GEM的建模步骤开始，逐渐展开对双层GEM（交叠和非交叠两种模式）及双层GEM搭配阳极丝的建模演示，从而为下一章的Garfield++模拟打下基础。

6.1 单层GEM的建模

6.1.1 单层GEM结构的显微镜观测

GEM的孔径尺寸及孔的排列规律会对后续阳离子回流比率造成很大的影响。在展开实验前，山东大学高能物理实验室使用显微镜对目前所有的4片GEM做了详细的尺寸检测（含备用），以保证它们全部达到了标准尺寸。如图6.1所示，随机抽查一部分孔，所观测到的孔距为 $140\mu\text{m}$ ，内孔径为 $50\mu\text{m}$ ，外孔径为 $70\mu\text{m}$ ，均达到了实验要求。其中孔的排列规律为正六边形，这就为后面双层GEM的交叠提供了物理基础。图中的Unit model A与Unit model B为建模中的标准单元，其用途会在后续小节中介绍。

6.1.2 建立模型单元

ANSYS参数化设计编程（ANSYS parameter design language, APDL）是一种通过参数化变量方式建立分析模型的脚本语言，不同于SolidWorks及Pro/E等实体化CAD建模软件，APDL按命令流的方式来完成用户的建模需求，所有输入量均通过参数化来完成，包括建立参数化的3D模型，参数化的材料定义，参数化的载荷、参数化的边界条件定义，参数化的网格划分与控制，参数化的分析控制和求解等，最终实现整个有限元分析过程[66]。对于复杂模型，APDL同样也提供了与主流CAD软件的接口。由于GEM的几何结构并不复杂，

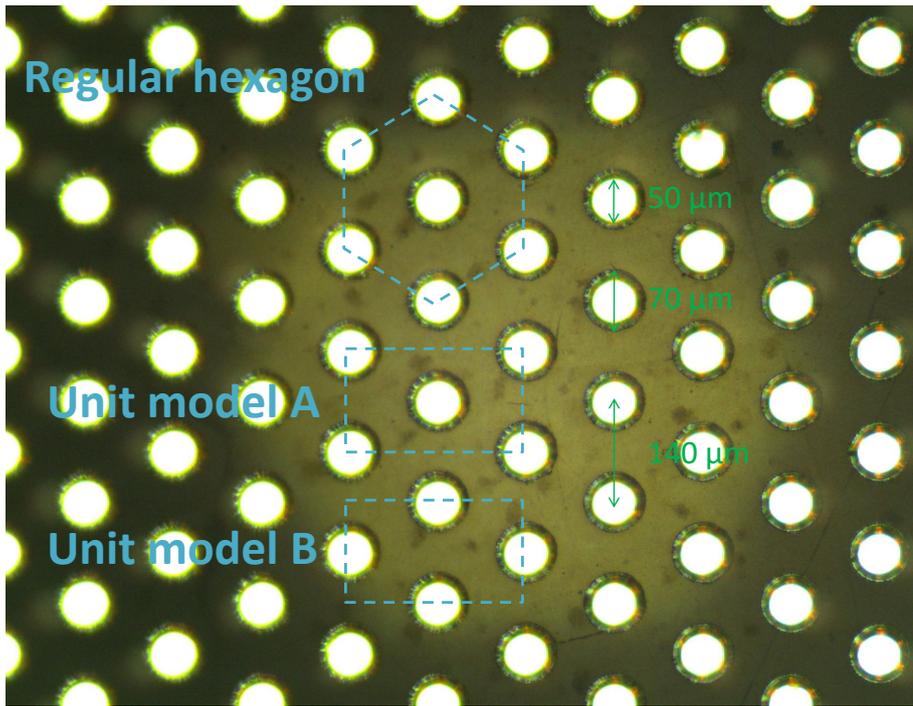


图 6.1: 单层GEM结构的显微镜观测

并且Garfield++能够对模型进行镜像延展的处理，所以只需要建立一个GEM单元模型便能实现对整层GEM的模拟。如图 6.2所示，整个GEM单元包含上下两层铜膜以及中间的kapton绝缘膜。每层铜膜厚度为 $5\mu\text{m}$ ，中间的kapton绝缘膜为 $50\mu\text{m}$ ，孔在平面内呈六角密堆状排布，每个孔呈倒双锥状结构，孔距为 $140\mu\text{m}$ ，内孔径为 $50\mu\text{m}$ ，外孔径为 $70\mu\text{m}$ （即图 6.1 中的Unit model A）。

6.1.3 添加载荷

下一步需要把建立好的单层GEM单元模型放到实际的配置环境中，即添加载荷。如图 6.3所示，在距离单层GEM单元模型下方 2mm 处添加与其相同面积且厚度为 0.5mm 的阳极板，在距离单层GEM单元模型上方 5mm 处添加与其相同面积且厚度为 0.5mm 的阴极板，GEM单元模型与两层板之间的中空部分添加气体，然后把相应的材质、介电常数添加到相应的部分。气体介电常数设置为1，GEM中间的绝缘Kapton介电常数设置为4，GEM上下层的金属部分设置为10。

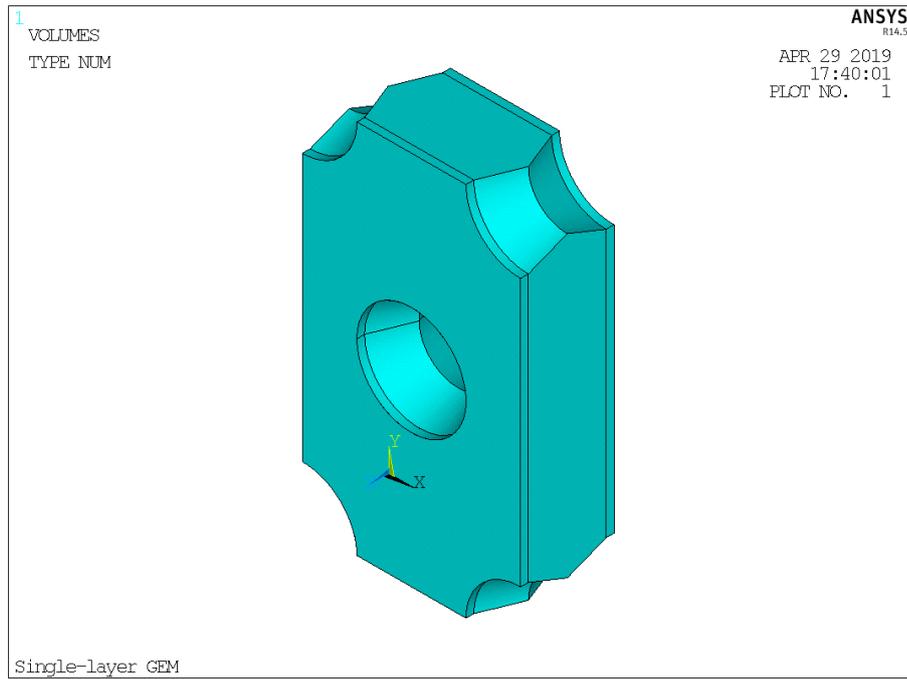


图 6.2: 单层GEM单元模型

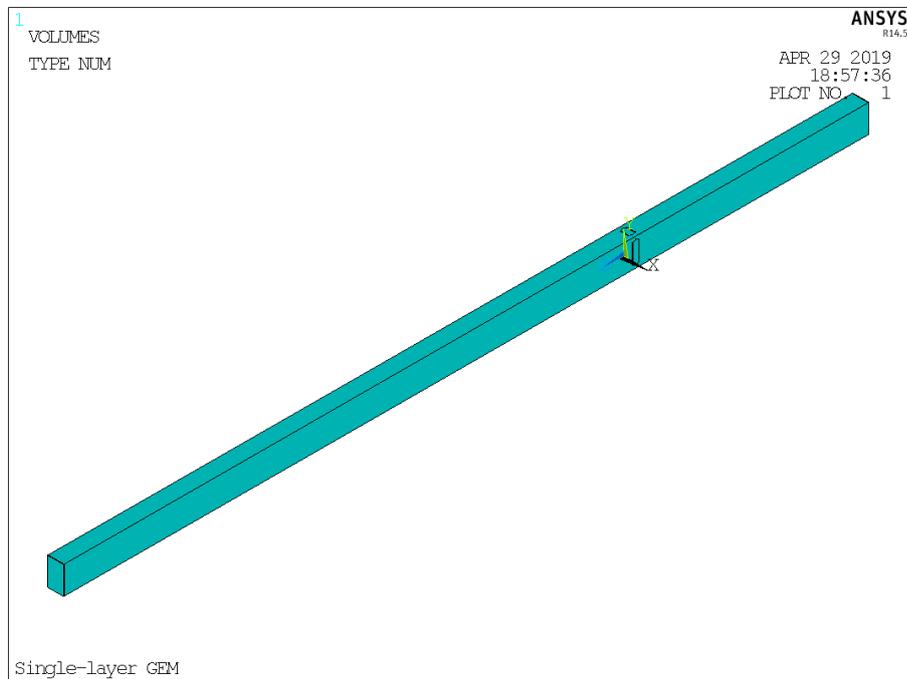


图 6.3: 添加载荷后的单层GEM单元模型

6.1.4 网格划分与求解

有限元分析法（Finite Element Analysis, FEA）即利用数学计算近似的对真实物理情景进行模拟的一种方法。首先把整个物理载体划分为相互作用的元素，然后用有限数量的元素去逼近模拟真实的物理系统。它将整个物理系统的求解域定义为有限元的互连子域，对每一单元推算出一个合适的近似解，然后最终求解这个域总的满足条件，从而得到该物理问题的解。但是需要注意的是，有限元分析法最终是通过近似解来无限逼近准确解。这种方法不仅精度极高无限接近于实际物理问题中的精确解，而且可以通过添加不同类型的物理载荷来解决各种复杂的物理问题。随着计算机技术的迅速发展，有限元分析法从最初的物理材料强度分析扩展到各个科学领域，成为一种实用且高效的物理分析手段。目前世界上比较流行的ANSYS、SDRC/I-DEAS等软件均提供有限元分析的功能。

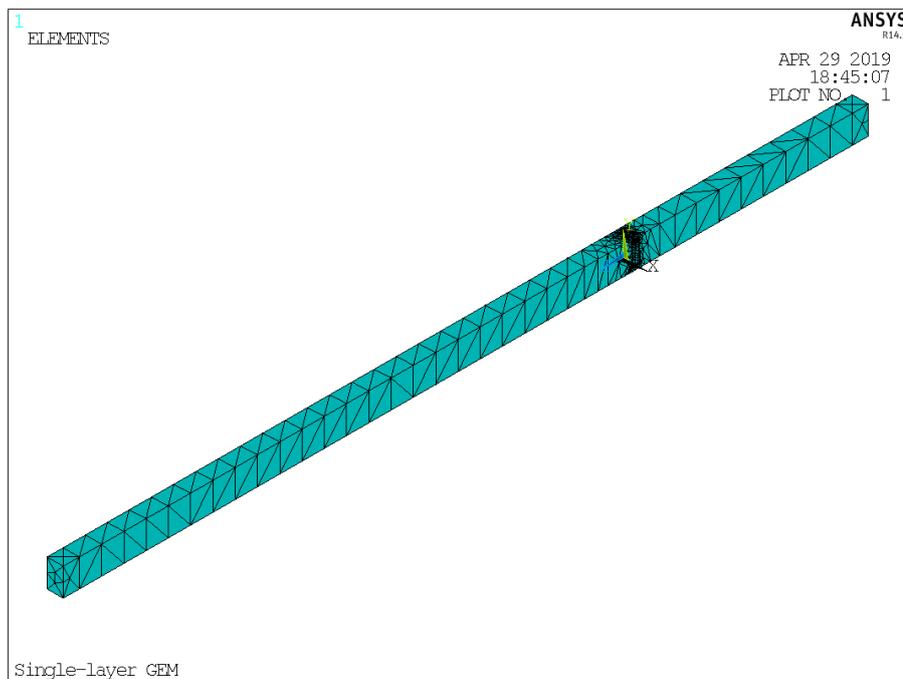


图 6.4: 划分网格后的单层GEM单元模型

有限元分析法中的网格划分步骤是整个模拟分析过程中至关重要的一步，它直接影响着后续计算分析结果的精确性。在软件中可以选择划分单元的类型、划分网格的细密度等。网格划分越精细其分析精度越高，但是同时要考虑计算机的运算负载能力，并不是网格划分的越细密越好，还要同时兼顾到运算效率。在APDL脚本中通常使用smrt命令来设置网格划分的精度，1为最粗

糙，10为最细密。在本文中将smrt的值设置为4。图 6.4显示了单层GEM单元模型的网格划分情况。

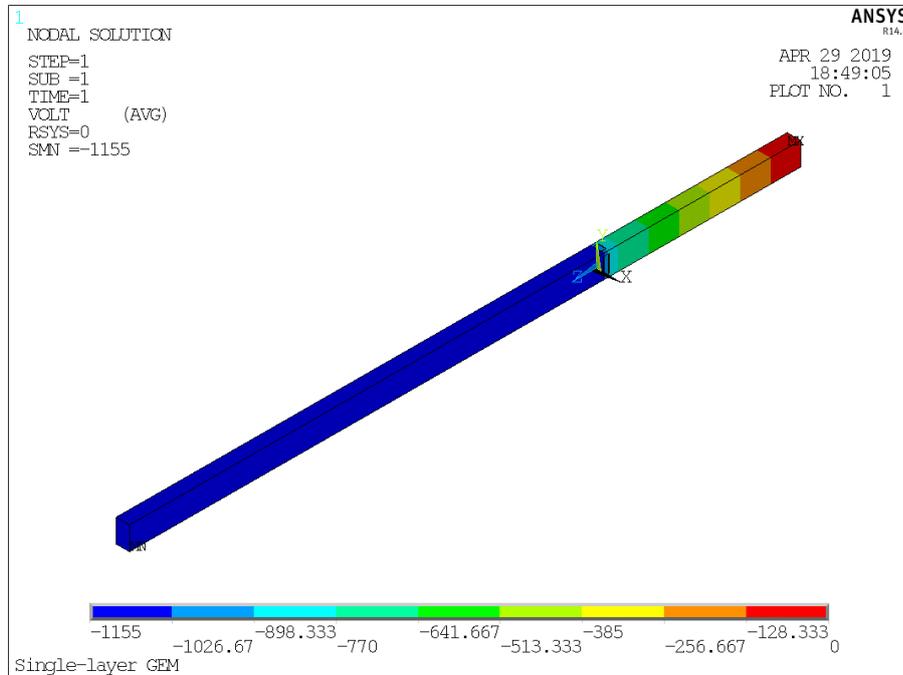


图 6.5: 经过求解后的单层GEM单元模型电势分布情况

经过网格划分后的物体，它的所有物理信息包括方程及边界条件等也就确定了。接下来的任务就是对这些方程组在特定的条件下进行求解。通常来说，求解方程的途径有两种方法：第一种，通过有限差分法、有解析法、半逆解法等直接对方程求解。第二种，通过变分法、加权残值法等对方程进行间接求解。其中第一种中的有限差分法使用最为广泛，即微积分法，通过展开泰勒级数来不断构造差分。然后用多个离散点来代替连续域的解，这些离散点便是上面所划分的网格节点。通过这些离散点函数来近似代替连续域上的函数，用差商来代替原方程组中的微商，经过上述变换后原方程组就变换为有限差分方程组，通过解此新方程组便可以得到原方程组的近似解。图 6.5显示了经过最终求解后GEM单元模型的电势分布情况。经过求解后APDL会自动生成四个文件：网格信息（ELIST.lis, NLIST.lis）、节点的解（PRNSOL.lis）、及材料列表（MPLIST.lis），这四个文件即包含了所有本次有限元分析的模拟数据。

6.2 双层GEM的建模

6.2.1 非交叠状态下的双层GEM

比起单层GEM，双层GEM可以更好的抑制在雪崩增益中产生的阳离子。非交叠的双层GEM是指平行放置的两层GEM上的孔恰好对齐。如图 6.6所示，同样利用ANSYS参数化设计语言，建立两个图 6.1中的Unit model A，尺寸为 $140.0\mu\text{m}\times 242.5\mu\text{m}$ 。将这两个单元模型A放置在同一坐标系中，沿电位垂直方向对齐，形成立方体单元。然后将材料、介电常数和电阻率等物理参数添加到模型的各个部分。网格生成和求解后，保存生成的立方体单元所携带的4个信息文件以备之后导入到Garfield++中进行分析，详细的APDL建模代码参见附录B。

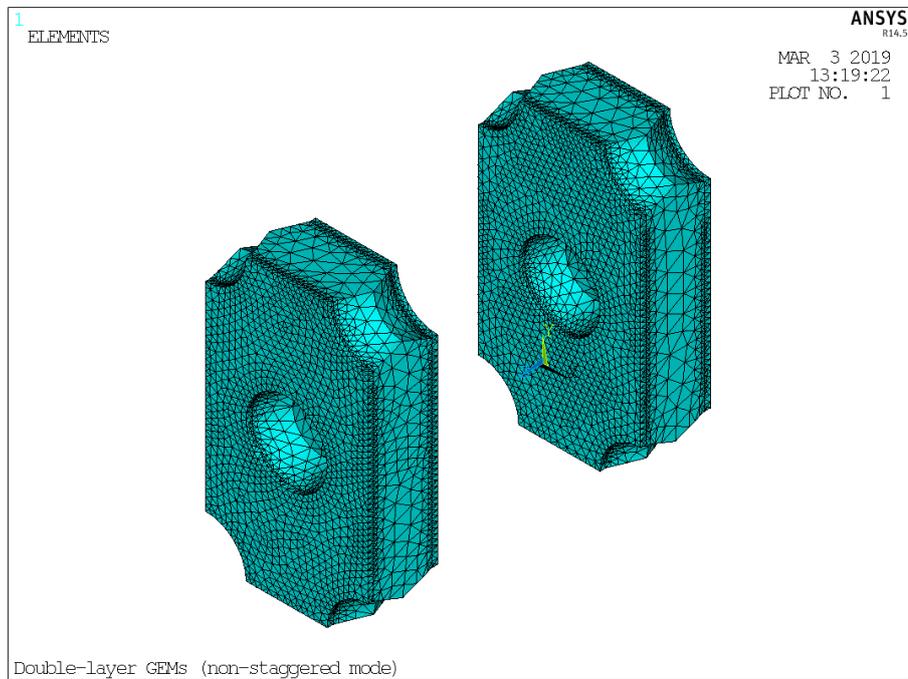


图 6.6: 处于非交叠状态下的双层GEM单元建模

6.2.2 交叠状态下的双层GEM

交叠的双层GEM是指平行放置的两层GEM上的孔恰好错开。在模拟中使用的是平移法，也就是上一章原型样机的搭建一节中介绍的第一种方法。如图 6.7所示，分别建立图 6.1中的Unit model A和Unit model B，尺寸同为 $140.0\mu\text{m}\times 242.5\mu\text{m}$ 。将这两个单元模型放置在同一坐标系中，沿电位垂直方

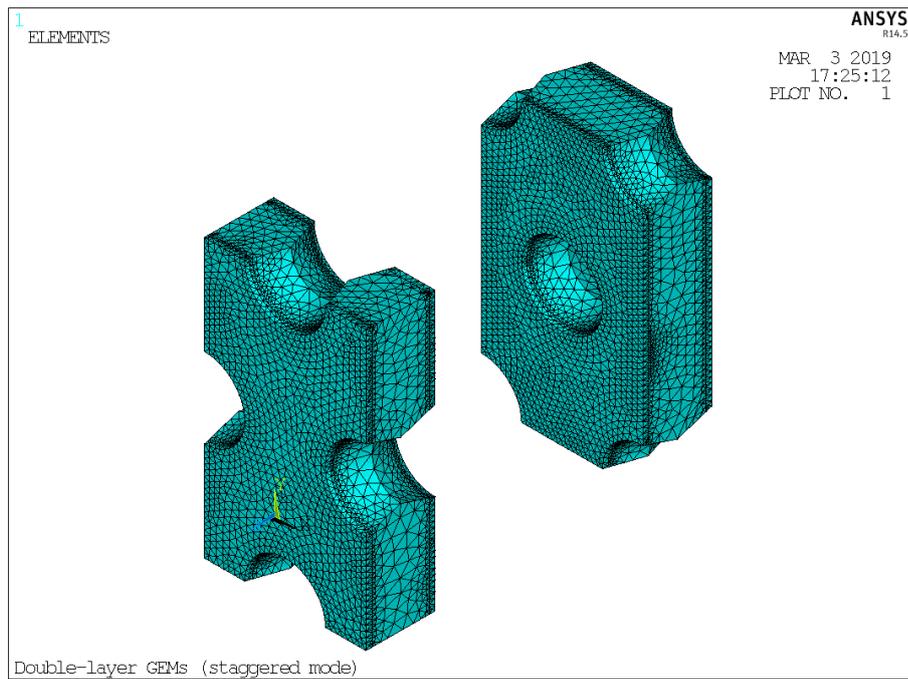


图 6.7: 处于交叠状态下的双层GEM单元建模

向对齐，形成立方体单元。单元模型A和单元模型B放置在同一个立方体单元内也就相当于第一种方法中的双层GEM位移交叠法，通过Garfield++中的镜像延展命令可以使两层GEM上所有孔的位置都达到完美交叠。然后将材料、介电常数和电阻率等物理参数添加到模型的各个部分。划分网格求解后将生成的4个信息文件保存到Garfield++目录下以备后面的性能模拟。详细的APDL建模代码参见附录B。

6.3 双层GEM加阳极丝的建模

通常来说，对于GEM的模拟，一般使用APDL搭配Garfield++的模拟链来进行。对于多丝正比室阳极丝的模拟，Garfield++有其内置的模块可以不借助APDL建模求解单独使用代码便可以对其模拟。两者在模拟思路不同。最终还是决定尝试把多丝正比室中的阳极丝一起拿到APDL中与GEM同时建模求解。这里需要注意的是，GEM模型单元的镜像延展距离为它的窄边 $140\mu\text{m}$ ，而阳极丝在实际探测器中的丝间距为 4mm ，所以如果只建立一个GEM模型单元和一根阳极丝的话，使用 $140\mu\text{m}$ 作为镜像延展单位，会导致阳极丝的间距变为 $140\mu\text{m}$ ，这样就不符合实际情况。所以更加准确的建模方式是同时建立28个GEM模型单元，然后把这28个GEM单元粘合为一个整的立方体。在

立方体一侧的边沿且距离为2mm处建立一根阳极丝，这样28个单元的长度为4mm，在使用镜像延展命令时以4mm为单位，如图 6.8所示，这个建模单元最终完美还原出了本文中所设计的双层GEM加阳极丝的探测器构造，pad板、阳极丝、上层GEM、下层GEM、漂移极板（阴极）之间的距离分别为2mm、2mm、2mm、5mm。

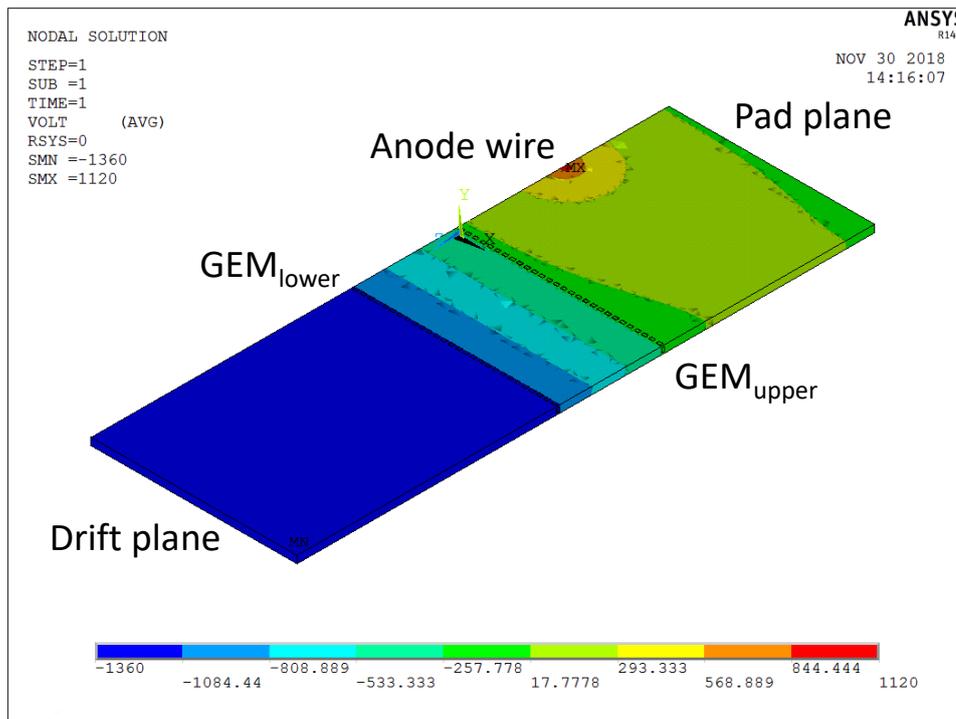


图 6.8: 双层GEM+阳极丝单元模型电势分布

按照探测器实际的电压配置，其中阳极丝电压 $V_{\text{anode wires}}$ 为1120V，双层GEM的压差均为255V，两层GEM之间的传输区场强为4.0kV/cm，漂移区场强为0.1kV/cm，pad及下层GEM的下表面电势保持在0V。经过求解后探测器各部位的电势分布也在图 6.8中得以呈现。

6.4 小结

在性能测试环节展开式之前，为了使用Garfield++模拟来验证之前的探测器配置方案的可行性，需要使用具有有限元分析功能的APDL软件来对探测器的各部件进行实体建模。本章完成了单层GEM、双层GEM（交叠与非交叠状态）、双层GEM搭配阳极丝的APDL建模。以单层GEM为例，详细讲解

了APDL的建模过程。通过对GEM上孔的正六边形排列规则的观察，作者根据上一章中所提到的双层GEM两种交叠方案，在模拟建模中使用了平移方案。最后经过求解将生成的空间电势分布文件导入到Garfield++中准备下一步的性能模拟。

第七章 基于Garfield++的时间投影室性能模拟

原初电子进入到探测器后会撞击气体分子逐步电离出次级电子，这些次级电子又会经过雪崩放大，期间同时产生出等量的阳离子。如果探测器内包含多级放大器，那还应该考虑电子及阳离子的传输问题等。以上过程涉及到大量的微观过程，比如电子与气体分子的碰撞、电子的雪崩增殖、电子与阳离子传输等。要描述这些过程仅靠推导计算是不够的，需要一款强大的专业模拟工具来完成。Garfield++是一个基于C++的专门用来模拟以气体混合物或者半导体材料为介质的各类粒子探测器。Garfield++内置了诸如Magboltz、Heed、SRIM等包含各项功能的独立软件包。Magboltz主要为模拟提供各项气体参数，可以还原电子雪崩的全过程。Heed及SRIM则用来模拟带电粒子的原初电离即生成电子-粒子对的过程。其他的比如MC及microscopic模块则可以还原电子及阳离子的传输过程[67]。Garfield++提供了与有限元分析程序进行连接的接口，通过将在有限元分析程序中得到的三维电场分布导入到Garfield++进行镜像复制可以对探测器的有效面积进行任意扩展。此外，Garfield++还可以结合ROOT来实现可视化模拟，比如绘制电子及阳离子的漂移路径、绘制探测器内静电势的分布等等。经过上一章的APDL建模，本章将首先分别对单层GEM、双层GEM下的增益、阳离子回流比率、电子的提取及收集效率进行研究，然后展开对探测器实际配置的研究，最终总结出一套适用于新型时间投影室的电场设置规律。

7.1 单层GEM的性能模拟

7.1.1 电子及阳离子的传输过程

图 7.1显示了用Garfield++中ViewDrift函数命令所绘制出的单层GEM电子和阳离子的三维漂移图（X-Z平面）[68]。模拟气体为P10（90%Ar+10%CH₄），收集区场强 E_{collect} 为4kV/cm，漂移区场强 E_{drift} 为0.1kV/cm，GEM的工作电压为255V。温度设置在25°C（298.15开尔文），压力控制在高于标准大气压2mbar（761.5毫米汞柱）

GEM（总体厚度60 μm ）的位置在 $z=0.00\text{cm}$ 处，漂移电场的方向为z轴方向，其中电子的运动轨迹为黄色，阳离子的运动轨迹为灰色。整个模拟过程中，在GEM孔上方漂移区距离GEM高度为2.5mm的位置释放100个原初电子，电子在漂移场的作用下以一定几率进入GEM孔径内部并电离气体分子发生雪崩，然后产生出大量的电子-离子对，其中少部分电子被GEM中间的kapton绝

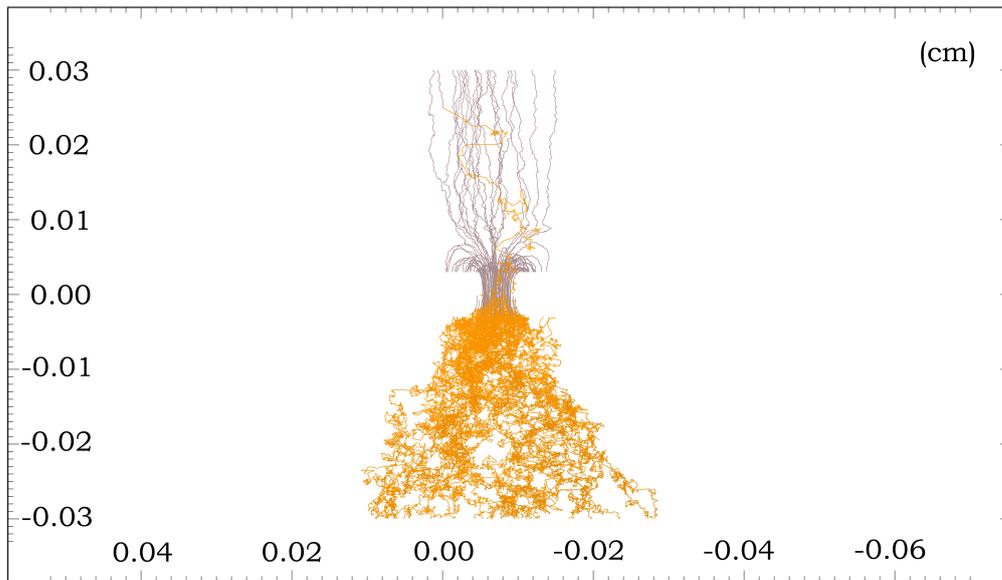


图 7.1: 单层GEM电子及阳离子的三维漂移轨迹（其中横向为x轴，纵向为z轴，y方向指向读者）

缘层和GEM下表面吸收，大部分电子会沿着收集电场到达探测器的pad。而在GEM孔内同时产生的阳离子则少部分被GEM中间的kapton绝缘层吸收，大部分被GEM上表面吸收或继续向上漂移到漂移区。

Position	Drift region	Upper metal	Kapton	Lower metal	Transfer region
Electrons	0%	0%	17.6%	44.9%	37.5%
Ions	5.1%	70.7%	24.2%	0%	0%

表 7.1: 单层GEM电子与阳离子的流向统计

对每一个电子及阳离子的传输过程进行追踪，通过统计其原初位置及终止位置的空间坐标可以对它们的去向进行量化统计。如表 7.1所示，对于电子来说，经过雪崩后17.6%的电子被GEM中间的kapton绝缘层吸收，44.9%的电子在向上传输的过程中被GEM的下层金属所吸收，剩余的37.5%电子进入下方的传输区继续向pad方向移动。而对于雪崩中产生的阳离子来说，会有24.2%的阳离子被中间的kapton绝缘层吸收，在向上传输的过程中会有70.7%的电子被GEM的上层金属所吸收，剩余的5.1%阳离子进入上方的漂移区继续向阴极方向移动。

7.1.2 电子的收集效率

当原初电子从漂移区漂移到上层GEM附近时，漂移区电场的强度将会影响GEM对电子的收集效率（成功进入GEM孔内的电子数/原初电子总数）[69]。如果漂移区电场太强，那么电场线会过多的终止于上层GEM的上表面，原初电子沿着电场线的方向往下漂移，从而导致过多的电子被GEM的上层金属所吸收，所以漂移电场不易过强。每个事例放入100个电子，总计500次事例。通过追踪所有电子终止点的空间坐标可以统计进入到GEM孔内的原初电子总数，而每个事例投入的原初电子总数是已知的，那么便可以计算出单次事例的电子收集效率。在每个漂移区电场的配置下重复500次，对得到的电子收集效率进行拟合后其RMS可以作为该电压配置下电子收集效率值的误差bar。如图7.2所示，漂移区场强0.1-0.6kV/cm为坪区，其间的电子收集效率可达100%，而随着漂移区场强的继续增大，电子收集效率持续下降，当进入2kV/cm后电子收集效率下降变缓，直到4kV/cm，此时电子的收集效率仅为54%。所以漂移电场的设置不易过大（超过0.6kV/cm）以保证电子以100%的几率进入到GEM中进行雪崩放大（也有助于提高探测器的计数率）。

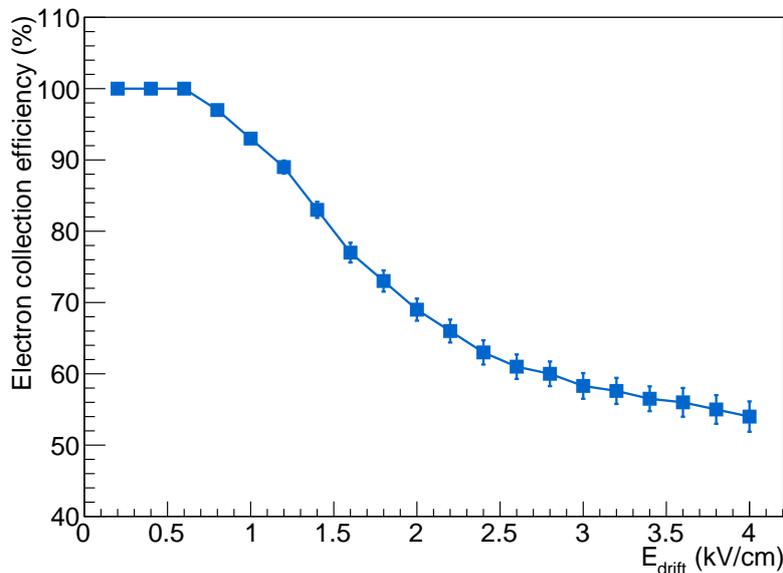


图 7.2: 电子的收集效率与漂移电场的关系

7.1.3 电子的雪崩增益

进入GEM孔洞的电子从电场中获得足够高的能量，可以使气体分子大量电

离产生雪崩倍增的效果，从而产生大量的电子-阳离子对。总共产生的电子个数比上释放在漂移区的电子数目即雪崩增益。需要注意的是，这里所说的雪崩增益指的是电子的总增益，而不是有效增益，总增益包含有效部分和无效部分，无效部分的电子来自雪崩但是最终被kapton绝缘层或者GEM的下层金属所吸收而无法被探测到，所以这部分增益是无效的。如图 7.3所示，如同预期的那样总增益随着GEM压差的增大而呈指数增长，当GEM的工作电压处于255V时，其总增益可以达到20倍左右。

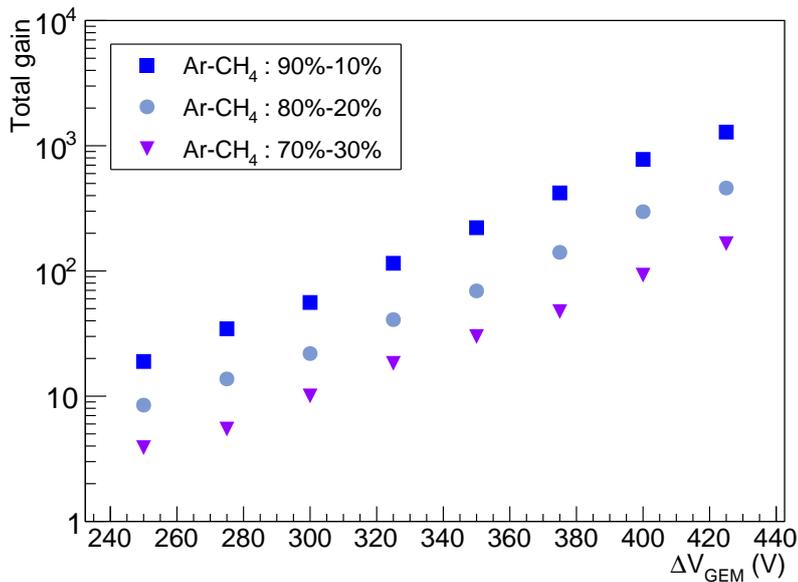


图 7.3: 单层GEM在三种不同气体比例下总增益与工作电压的变化关系

而气体的选择同样会影响增益的大小和稳定性。通常来说，工作在正比区的探测器所使用的工作气体，往往希望它能在较低的工作电压下提供较高的增益，其响应和回复时间短，同时保持较好的正比性。在惰性气体的选择上，Ar由于制作简便造价便宜所以被广泛使用。对于Ar而言，处于激发态时能够通过发射光子的方式回到基态。在惰性气体中加入CH₄作为淬灭气体可以迅速使释放光子后的Ar回归稳定状态。这就使得探测器能稳定工作并获得较高的增益。在三种不同的惰性气体与淬灭气体比例下，三条曲线呈带状分布。且惰性气体的比例越高，要获得相同增益下所需的GEM工作电压就越低，所以在一定范围内提升Ar的比例可以有效提高总增益。在Ar比例提升至90%的条件下，单层GEM的模拟总增益可达10³。所以相较于其他两种气体比例，选择P10作为工作气体，GEM无需耐受较高的工作电压便可以获得可观的增益。

7.1.4 电子的提取效率

经过雪崩增益后产生的电子会继续向下传输，其中一部分会被GEM的下表面金属所吸收，剩余的部分会进入GEM与pad之间的传输区间最后被pad收集。电子的提取效率定义为到达GEM与pad之间的传输区间的电子数目占雪崩总共产生的电子数目的百分比，如图 7.4所示，电子的提取效率几乎线性的随着收集区场强的增大而增大，而且几乎不依赖于气体的比例。当收集电场为3kV/cm时，电子的提取效率维持在30%左右。当收集电场提升至7kV/cm时，电子的提取效率可以提升至60%左右。

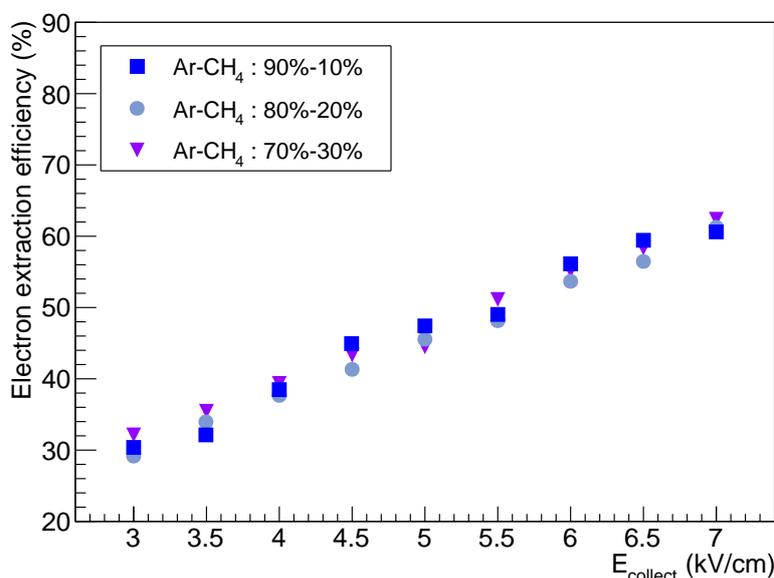


图 7.4: 单层GEM在三种不同气体比例下电子提取效率与收集电场的变化关系

相比于上面提到的总增益，有效增益才是更加值得关注的量，它代表可以被电子学实际探测到的电子增益数目。经过上述对电子传输全过程的清晰阐述，目前可以通过计算来求得单层GEM对电子的有效增益 G_{eff} [69]:

$$G_{eff} = \epsilon_{collection} \cdot G_{total} \cdot \epsilon_{extraction} \quad (7.1)$$

其中 $\epsilon_{collection}$ 为电子的收集效率， G_{total} 为电子雪崩的总增益， $\epsilon_{extraction}$ 为电子的提取效率。由上述公式可以看出，如果要使有效增益尽可能的大，其中增大 G_{total} 可以简单的通过提升GEM的工作电压来实现，但是在实际使用中GEM的工作电压过高会导致放电打火从而损坏GEM，所以一定要避免施加过高的工作电压（450V以上）。提升 $\epsilon_{collection}$ 就要避免应用过大的漂移区场强，所以0.1-0.4kV/cm为比较常见的漂移区场强设置。而提升 $\epsilon_{extraction}$ 就需要

增大GEM与pad之间的收集场强，值得注意的是，该收集场强不能无限增大，该区域场强过大会将GEM孔中心的增益区域扩大至空外从而导致增益的不稳定性[70]，所以1-4kV/cm为比较常见的收集区场强设置。

7.2 双层GEM的性能模拟

7.2.1 非交叠与交叠模式下电子及阳离子的传输过程

与单层GEM相比，双增GEM条件下的电子与阳离子的传输过程则复杂了很多。对于电子而言，经过第一级放大后，少部分电子被上层GEM的下表面和kapton绝缘层吸收，绝大部分电子进入传输区。进入传输区的电子在传输区电场的作用下进入下层GEM进行第二级放大，而下层GEM的上表面、下表面、kapton绝缘层都会吸收一部分电子，最后剩余的电子进入收集区最终被pad收集。

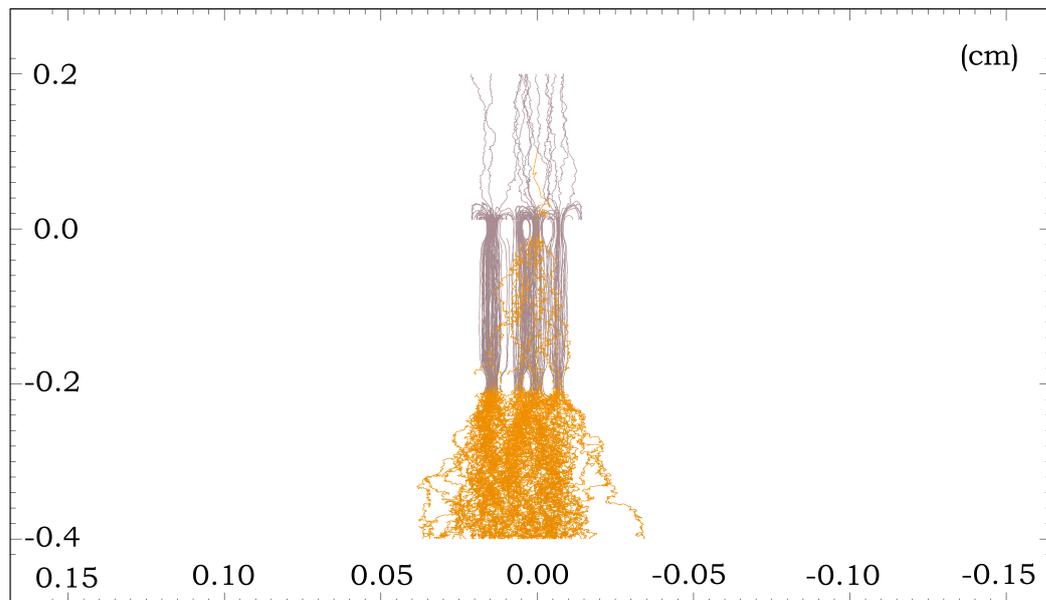


图 7.5: 双层GEM非交叠模式下电子及阳离子的三维漂移轨迹（其中横向为x轴，纵向为z轴，y方向指向读者）

图 7.5与图 7.6分别显示了用Garfield++中ViewDrift函数命令所绘制出的处于非交叠和交叠模式下双层GEM电子和阳离子的三维漂移图（X-Z平面）。模拟气体为P10（90%Ar+10%CH₄），收集区场强 $E_{collect}$ 为4kV/cm，漂移区场强 E_{drift} 为0.1kV/cm，两层GEM之间的传输区场强为4kV/cm，两层GEM的工

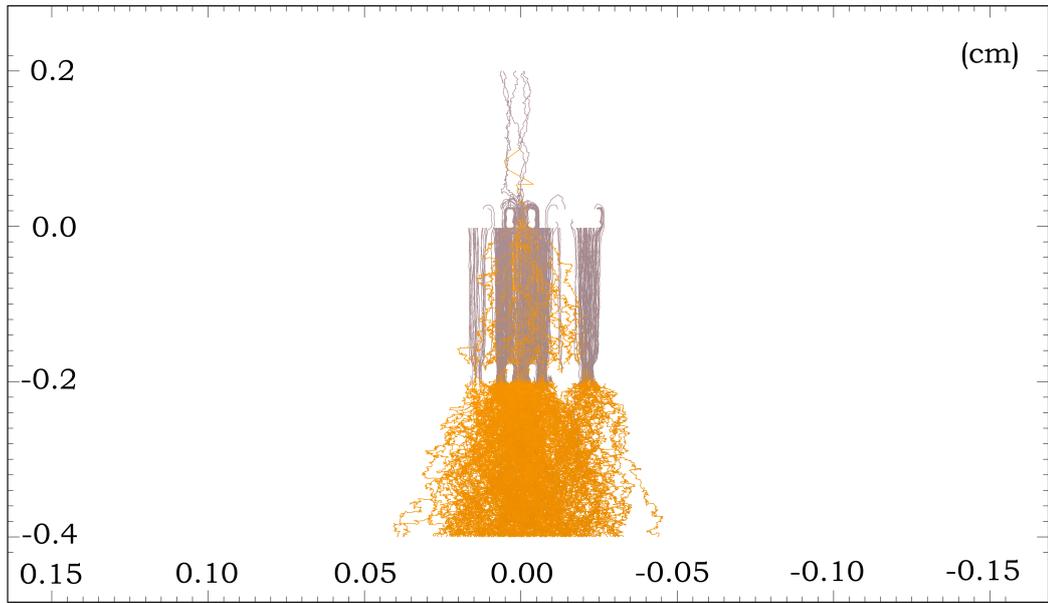


图 7.6: 双层GEM交叠模式下电子及阳离子的三维漂移轨迹（其中横向为x轴，纵向为z轴，y方向指向读者）

作电压都为255V。温度设置在25°C（298.15开尔文），压力控制在高于标准大气压2mbar（761.5毫米汞柱）

GEM（总体厚度60 μm ）的位置在 $z=0.00\text{cm}$ 处，其中电子的运动轨迹为黄色，阳离子的运动轨迹为灰色。整个模拟过程中，在上层GEM孔洞上方漂移区距离GEM高度为2.5mm的位置释放100个原初电子，电子在漂移场的作用下以一定几率进入GEM孔径内部并电离气体分子发生雪崩，这与单层GEM原理相同。

Position	Non-staggered mode	Staggered mode
Drift region	(2.9 \pm 0.4)%	(0.7 \pm 0.1)%
Upper metal on GEM _{upper}	(59.3 \pm 4.5)%	(47.0 \pm 4.1)%
Kapton on GEM _{upper}	(3.9 \pm 0.4)%	(4.6 \pm 0.5)%
Lower metal on GEM _{upper}	(0.7 \pm 0.1)%	(19.3 \pm 2.5)%
Upper metal on GEM _{lower}	(11.7 \pm 1.5)%	(7.6 \pm 1.2)%
Kapton on GEM _{lower}	(21.5 \pm 3.2)%	(20.8 \pm 2.7)%
Lower metal on GEM _{lower}	0%	0%

表 7.2: 双层GEM非交叠与交叠模式下阳离子的流向统计

单独对阳离子的去向进行量化统计后可以发现，如表 7.2所示，对于非交叠模式来说，雪崩产生的总阳离子数有分别有 $(21.5\pm 3.2)\%$ 和 $(11.7\pm 1.5)\%$ 被下层GEM的kapton绝缘层和上层金属所吸收，经过传输区后，分别有 $(0.7\pm 0.1)\%$ 、 $(3.9\pm 0.4)\%$ 、 $(59.3\pm 4.5)\%$ 的阳离子被上层GEM的下层金属、kapton绝缘层、GEM的上层金属所吸收，最后剩余的 $(2.9\pm 0.4)\%$ 进入漂移区内。而对于交叠模式来说，雪崩产生的总阳离子数有分别有 $(20.8\pm 2.7)\%$ 和 $(7.6\pm 1.2)\%$ 被下层GEM的kapton绝缘层和上层金属所吸收，经过传输区后，分别有 $(19.3\pm 2.5)\%$ 、 $(4.6\pm 0.5)\%$ 、 $(47.0\pm 4.1)\%$ 的阳离子被上层GEM的下层金属、kapton绝缘层、上层GEM的上层金属所吸收，最后剩余的 $(0.7\pm 0.1)\%$ 进入漂移区内。值得注意的是，两种模式下最显著的对比为上层GEM的下层金属对于回流的阳离子的抑制作用相差高达大约18.6%，以上效应在图 7.5与图 7.6中也得到了很好的印证。

7.2.2 非交叠与交叠模式下阳离子的回流比率

对于阳离子，其中少部分是在上层GEM一级雪崩时产生的，而绝大部分阳离子是在下层GEM二级雪崩时产生的。这些阳离子在电场的作用下沿与电子相反的方向运动，少部分被下层GEM吸收，进入传输区后继续往上漂移，其中部分会被上层GEM的下表面所吸收，吸收的量取决于两层GEM的交叠程度，两层GEM的交叠程度越高则被阻挡的阳离子越多。

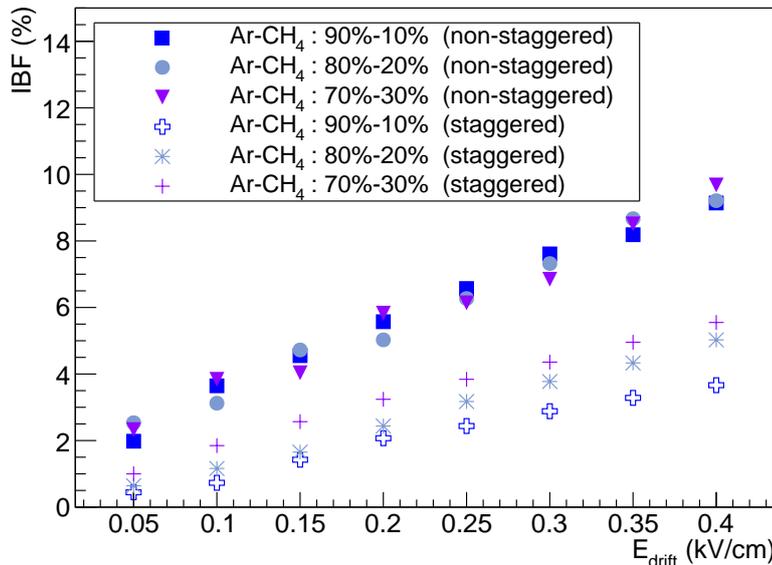


图 7.7: 双层GEM非交叠与交叠模式处于不同气体 (Ar+CH₄) 比例下阳离子的回流比率

图 7.7显示了在不同气体比例下及双层GEM处在不同状态下的阳离子回流比率，即回流到漂移区的阳离子数量占一共产生的阳离子总量的百分比[71, 72]。在非交叠模式下，Ar的比例对阳离子的回流比率没有明显的影响，并且随着漂移电场的增大，阳离子回流比率线性的由大约2%增大至9%。而在交叠模式下，Ar的比例对阳离子的回流比率产生了明显影响，Ar的比例越高，其阳离子回流比率越低。在Ar:CH₄=90%:10%的条件下，随着漂移电场由0.05kV/cm增大至4kV/cm，阳离子回流比率线性的由大约0.5%增大至3%。所以由此可以看出要降低阳离子的回流比率，Ar的比例尽量要高，尽量避免应用较大的漂移电场（而且漂移电场较大同样也会影响电子的收集效率，该部分内容已经在前面的小节中进行过介绍）。上述结果显示，在抑制阳离子回流方面双层GEM交叠模式在整体上要优于非交叠模式。需要补充的是，交叠状态只会阻挡阳离子的传输而不会限制电子，因为电子的质量远小于阳离子，其横向扩散远远大于电子，在图 7.5 与图 7.6中也可以很清晰的看到图中的黄线（电子的漂移轨迹）并没有受到任何限制。

7.2.3 交叠模式下电子的雪崩增益

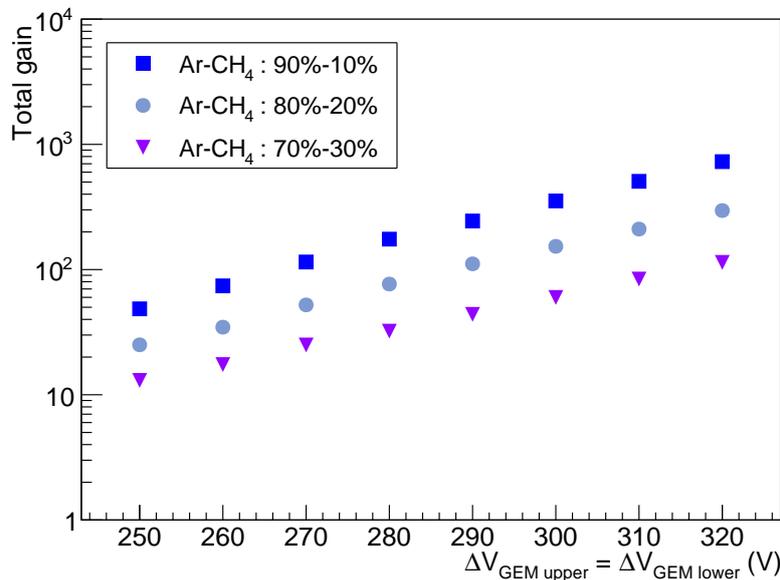


图 7.8: 交叠模式下的双层GEM处于三种不同气体 (Ar+CH₄) 比例中总增益与GEM工作压差的变化关系

在增益方面，双层GEM叠加联级使用相比单层GEM则更加具有优势。原初电子经过上层GEM雪崩放大后少部分被吸收，剩余的绝大部分再进入下

层GEM进行雪崩放大，显然两次雪崩得到的增益远大于单次的增益。所以与单层GEM相比，要达到相同的增益，双层GEM在较低的工作电压下便可以实现，这样大大降低了GEM打火的几率，从而可以延长探测器的寿命。

图 7.8显示了处于三种不同气体比例下双层GEM总增益与压差的变化曲线。在三种不同的惰性气体与淬灭气体比例下，三条曲线呈带状分布。且惰性气体的比例越高，要获得相同增益下所需的GEM工作电压就越低，这一点与单层GEM处于三种不同气体比例下的增益表现相同。而对于模拟中的电场参数，其中漂移区电场 E_{drift} 为0.1kV/cm，收集区电场 $E_{collect}$ 为4.0kV/cm，传输区电场 $E_{transfer}$ 为4.0kV/cm。两层GEM的压差在250V至320V之间逐渐提升，增益则同期望的那样呈现指数增长，由 10^1 增加至 10^3 。

7.2.4 交叠模式下电子的提取效率

在电子提取效率方面，不同于单层GEM，在双层GEM处于交叠模式的条件下电子的提取效率明显依赖于气体的比例。如图 7.9所示，在三种不同的Ar和CH₄比例下，三条曲线呈带状分布，且Ar的比例越高，电子的提取效率则越高。而且在同一气体比例下，电子的提取效率随着收集电场的增大而稳步提升。

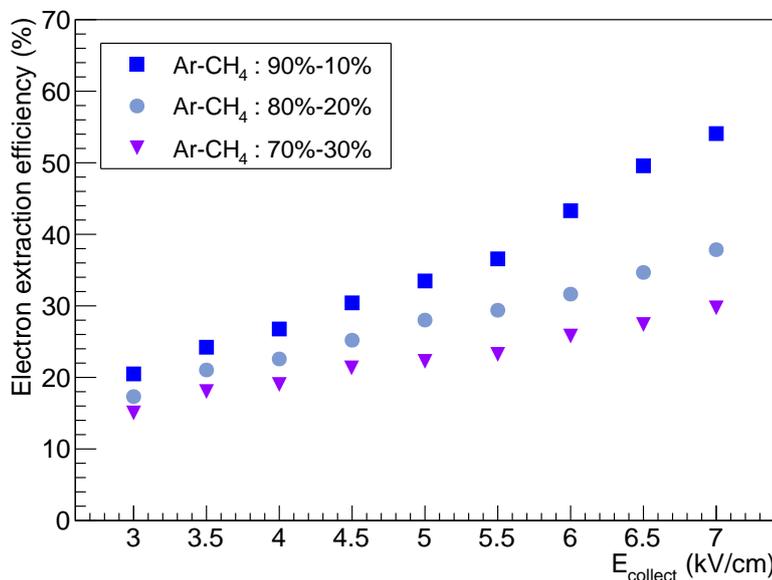


图 7.9: 双层GEM交叠模式处于不同气体 (Ar+CH₄) 比例中的电子提取效率

在Ar:CH₄=90%:10%的条件下，随着下层GEM下面的收集电场由3kV/cm增大至7kV/cm（此处电场不易过大，通常不超过4kV/cm，过大的电场会导致增

益的不稳定), 电子的提取效率由大约20%提升至大约55%, 电子的提取效率越高, 则能被pad收集到的雪崩电子越多, 有效增益就越大, 所以这同样是高比例Ar应用的优点之一。

7.3 双层GEM搭配阳极丝面的性能模拟

经过对单层GEM及双层GEM的模拟后, 对其增益、电子收集效率、电子提取效率、阳离子回流比率等重要基础性能进行模拟分析获得了不少量化结果。由模拟结果可知, 要获得相同的增益, 双层GEM比起单层GEM所需的工作电压更低。在抑制阳离子回流方面, 双层GEM也要优于单层GEM, 而当双层GEM处于交叠模式时还能进一步对其进行抑制。最终将双层交叠GEM及阳极栅面放入仿真的探测器实际工作环境中, 整个探测器实际包含三级放大器, 即上层GEM、下层GEM、阳极丝。

7.3.1 每一级放大器有效增益的估算

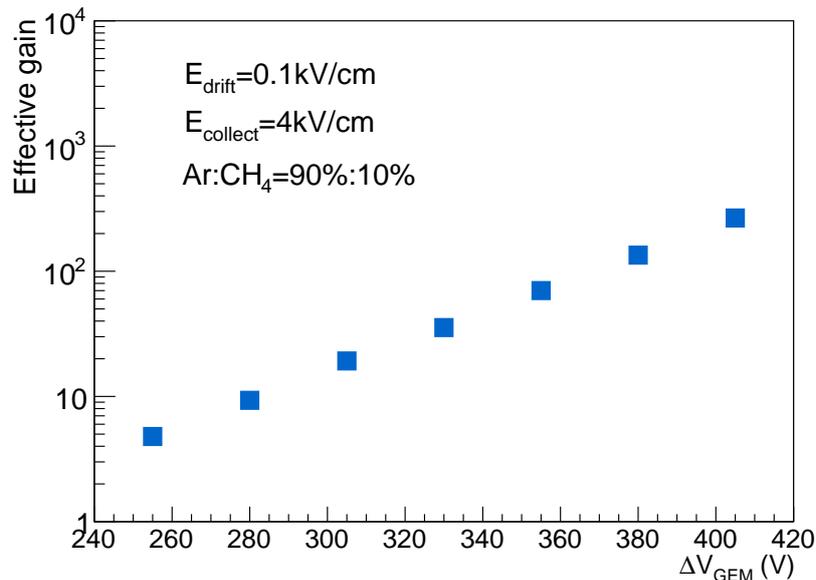


图 7.10: 单层GEM一级雪崩放大提供的有效增益与GEM工作压差的变化关系

原初电子漂移到上层GEM附近后, 其对电子的收集效率将会受到漂移电场的影响。考虑到这个因素, 当漂移区电场处于0.1kV/cm至0.4kV/cm时, 电子的收集效率会保持在100%, 而阳离子回流比率又正比于漂移区电场, 所以在不需要对漂移区电场进行扫描时, 将其设置为0.1kV/cm。电子进入上层GEM后

发生一级雪崩，产生的电子会被GEM的各部分吸收一些，未被吸收的进入到双层GEM之间的传输区。这部分电子以一定的收集效率被第二层GEM收集后进行二级雪崩放大，产生的电子同样会被该层GEM的各部分吸收一些，未被吸收的进入到阳极丝与下层GEM的收集区间。最终这部分电子被阳极丝全部收集后进行三级雪崩放大，从而完成整个电子的整个传输放大过程，所以对整个过程每一级的雪崩放大量级要有一个评估。

图 7.10显示了单层GEM的有效增益随其工作压差的变化关系，对于一级雪崩来说，漂移电场为0.1kV/cm，收集电场为4kV/cm，在工作电压为255V时，有效增益大约为4.5。而对于二级雪崩，其漂移电场变为整个系统的传输区电场，这个值设置为4kV/cm，而收集电场仍为4kV/cm，此时相对于一级雪崩来说，其对电子的收集效率由100%下降为54%（参见图 7.2），所以二级雪崩的有效增益下降为大约2.5倍，那么对于两层GEM总的有效增益为11倍左右。经过前两级放大后的电子漂移到阳极丝上方，下面的工作原理就如同多丝正比室了。对于阳极丝，它可以将移动到附近的电子全部吸收，所以不存在收集效率的概念，当阳极丝工作电压处于1120V时，增益处于2300-2500之间都是正常的。

7.3.2 传输区场强对于阳离子回流比率的影响

优化传输区场强可以进一步提高探测器对于阳离子回流的抑制能力。图 7.11显示了传输区场强 E_{transfer} 及漂移区场强 E_{drift} 对于整个探测器阳离子回流比率的影响。由图可知，阳离子回流比率几乎线性的依赖于漂移区电场，这个效应在前面的小节中已经见到过了。重要的是对于相同的漂移区场强，随着传输区场强 E_{transfer} 的增大，探测器对于阳离子回流的抑制作用不断增强，这是因为传输区场强越大，回流的阳离子被上层GEM的下表面吸收的越多，这个原理与GEM对电子的收集效率类似。当 E_{drift} 为0.1kV/cm且 E_{transfer} 为6.0kV/cm或者8.0kV/cm时，阳离子回流比率甚至可以被抑制到低于0.35%（在本文中传输区场强 E_{drift} 选择设置为4.0kV/cm。如果对增益稳定度要求略低的话，可以尝试超过4.0kV/cm的传输区场强）。

7.3.3 探测器各部位对阳离子的吸收比率

将探测器的漂移区场强、传输区场强分别设置为0.1kV/cm、4kV/cm，两层GEM的工作电压都为255V，阳极丝的工作电压为1120V。对整个探测器内阳离子的去向进行量化统计，其中每一个模拟事例包含10个原初电子，共500次事例，经过对结果的高斯拟合可以得到相应部位吸收比率的中心值和sigma。如表 7.3所示，对于非交叠模式来说，经过三级雪崩产生的总阳离

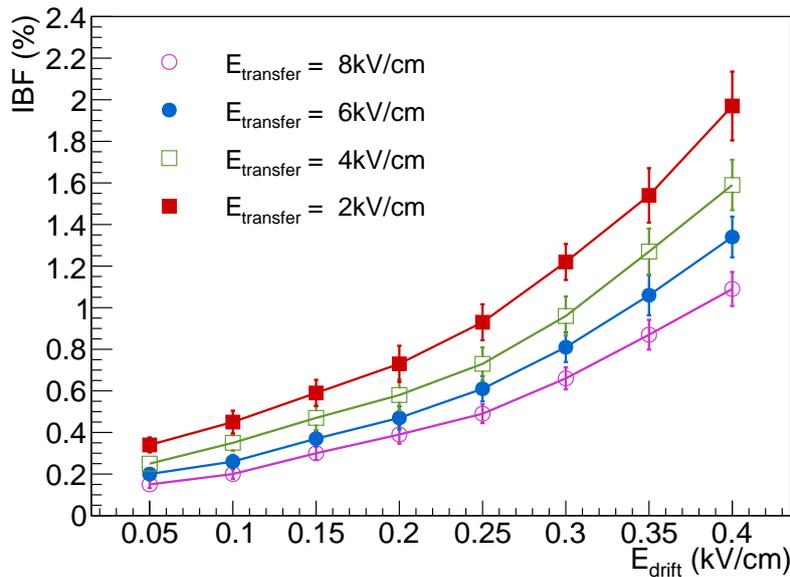


图 7.11: 在不同的传输区场强的条件下, 阳离子回流比率与漂移区电场的变化关系

子数有 $(31.0 \pm 3.4)\%$ 被pad所吸收, 剩余的部分随着电场的方向向上漂移, 分别有 $(1.3 \pm 0.2)\%$ 、 $(1.7 \pm 0.2)\%$ 、 $(0.3 \pm 0.1)\%$ 的阳离子被下层GEM的下层金属、kapton绝缘层、GEM的上层金属所吸收。经过传输区后, 分别有 $(1.6 \pm 0.2)\%$ 、 $(1.9 \pm 0.2)\%$ 、 $(58.7 \pm 4.9)\%$ 的阳离子被上层GEM的下层金属、kapton绝缘层、GEM的上层金属所吸收, 最后剩余的 $(3.5 \pm 0.5)\%$ 进入漂移区内。对于交叠模式来说, 经过三级雪崩产生的总阳离子数有 $(29.5 \pm 3.1)\%$ 被pad所吸收, 剩余的部分随着电场的方向向上漂移, 分别有 $(1.2 \pm 0.2)\%$ 、 $(1.5 \pm 0.2)\%$ 、 $(0.2 \pm 0.1)\%$ 的阳离子被下层GEM的下层金属、kapton绝缘层、GEM的上层金属所吸收。经过传输区后, 分别有 $(21.2 \pm 2.9)\%$ 、 $(1.6 \pm 0.2)\%$ 、 $(44.4 \pm 4.1)\%$ 的阳离子被上层GEM的下层金属、kapton绝缘层、GEM的上层金属所吸收, 最后剩余的 $(0.4 \pm 0.1)\%$ 进入漂移区内。

显然, 在两种模式下, 阳极丝只会产生雪崩增益而不会吸收阳离子。大多数阳离子被上层GEM吸收, 并且大约有30%的阳离子被pad吸收。两种模式下最显著的对比为上层GEM的下层金属对于回流的阳离子的抑制作用相差高达19.6%, 并且最终的阳离子回流比率在非交叠模式和交叠模式下分别可以达到 $(3.5 \pm 0.5)\%$ 和 $(0.4 \pm 0.1)\%$, 显然双层交叠GEM搭配阳极丝的组合可以将探测器对阳离子的抑制能力最大化。

Position	Non-staggered mode	Staggered mode
Drift region	$(3.5 \pm 0.5)\%$	$(0.4 \pm 0.1)\%$
Upper metal on GEM _{upper}	$(58.7 \pm 4.9)\%$	$(44.4 \pm 4.1)\%$
Kapton on GEM _{upper}	$(1.9 \pm 0.2)\%$	$(1.6 \pm 0.2)\%$
Lower metal on GEM _{upper}	$(1.6 \pm 0.2)\%$	$(21.2 \pm 2.9)\%$
Upper metal on GEM _{lower}	$(0.3 \pm 0.1)\%$	$(0.2 \pm 0.1)\%$
Kapton on GEM _{lower}	$(1.7 \pm 0.2)\%$	$(1.5 \pm 0.2)\%$
Lower metal on GEM _{lower}	$(1.3 \pm 0.2)\%$	$(1.2 \pm 0.2)\%$
Pad	$(31.0 \pm 3.4)\%$	$(29.5 \pm 3.1)\%$

表 7.3: 双层GEM非交叠与交叠模式下对整个探测器内阳离子的流向统计

7.4 小结

在Garfield++模拟的帮助下，首先对单层GEM及双层GEM的电子及阳离子的传输规律、电子的收集效率、电子的提取效率、增益等重要属性进行了模拟并得到了量化结果。经过以上的模拟总结并摸索出了一部分电场的设置规律。在最终对探测器实际配置的模拟中（即双层交叠GEM搭配阳极丝），漂移区场强 E_{drift} 设置为 0.1kV/cm ，传输区场强 E_{transfer} 设置为 4kV/cm ，阳极丝工作电压设置为 1120V ，两层GEM的工作电压设置为 255V 。在以上具体配置下，探测器在整个模拟过程中表现稳定，并没有出现增益异常的情况，阳离子回流比率可以被抑制到 0.4% 左右。模拟中所采用的与STAR TPC环境变量类似的参数（气体组分、温度、气压等）也都证明可以为该新型时间投影室结构提供稳定的工作环境。

第八章 基于气体电子倍增器及阳极栅面的时间投影室性能测试

前期的Garfield++性能模拟为后期的性能测试提供了电压参数设置以及部分理论性能预测，但能否达到预期还要经过性能测试。本章将详细介绍探测器的增益、能量分辨率、阳离子回流比率、计数率等性能测试结果，并将重点研究探测器在各种配置下的阳离子回流率，其模拟值及实验值将得到对比。

8.1 增益及能量分辨率测试

8.1.1 ^{55}Fe 放射源辐照原理

在第五章经过对整套多道脉冲分析仪测试系统的刻度之后，马上要对探测器进行 ^{55}Fe 辐照下的能谱测试。首先需要了解整个辐照作用的机理过程。该过程中最重要的便是光电效应，即低能光子被介质原子吸收而释放出电子的过程。设光子的能量为 E_r ，光电效应只有在 $E_r \geq$ 原子j壳层电子的结合能 E_j 时才能发生（对于 $E_r > E_j$ 的壳层，均对抵消吸收能量 E_r 有贡献）。当携带能量 E_r 的光子被j壳层吸收后，释放出携带能量为 $E_e = E_r - E_j$ 的光电子。当光电效应发生后，从内壳层打出光电子（光电子在原子的内壳层的产生几率高于外壳层），就会在该壳层留下空缺，此时原子处于激发态。处于激发态的原子终究要回到基态。两种方法可以使激发态最终退激回到基态。第一种方法是外层电子跃迁到内层并辐射出特征x射线来释放掉两者的结合能差值。第二种方法是外层电子吸收掉退激发的能量并在原子中逃出，该电子也被称为俄歇电子[47]。

具体来说对于P10气体中的Ar， ^{55}Fe 会辐射出能量为5.9keV的X射线，Ar原子K壳层和L壳层的结合能分别为 $E_k = 3.20\text{keV}$ 和 $E_l = 0.287\text{keV}$ ，当X射线光子被K壳层吸收后释放出的光电子能量为[73]：

$$E_1 = E_x - E_k = 5.90\text{keV} - 3.20\text{keV} = 2.7\text{keV} \quad (8.1)$$

经过此光电转换过程后，Ar原子处于激发态且不稳定，所以要退激到较低的能态上。此时便有两种机制竞争发生。第一种是Ar原子L壳层的电子直接过来填充K壳层留下的空缺，两个壳层之间结合能的差值为该电子跃迁时放出的能量，其大小为：

$$E_{r'} = E_k - E_l = 3.20\text{keV} - 0.287\text{keV} = 2.91\text{keV} \quad (8.2)$$

这部分能量会以特征X射线的方式辐射出来。第二种是该光子再在L壳层上激发出光电子（俄歇电子），其能量为：

$$E_2 = E_{r'} - E_1 = 2.91\text{keV} - 0.287\text{keV} = 2.623\text{keV} \quad (8.3)$$

所以当 ^{55}Fe 释放的X射线辐照探测器的时候，能谱上会出现两个峰。一个是在 $E_1 + E_2 = 5.33\text{keV}$ 处产生的全能峰，另一个是在 $E_1 = 2.7\text{keV}$ 处产生的逃逸峰。逃逸峰的形成是因为在原子退激时所释放的特征X射线并没有在探测器内发生相互作用而逃逸出探测器而形成的。对于P10来说，Ar的电离能 E_{Ar} 为26eV， CH_4 的电离能 E_{CH_4} 为28eV[47]，那么P10的平均电离能为：

$$E_{\text{P10}} = E_{\text{Ar}} \times 90\% + E_{\text{CH}_4} \times 10\% = 26.2\text{eV} \quad (8.4)$$

那么全能峰对应的原初电子数目便为 $5330\text{eV}/26.2\text{eV} = 203$ ，逃逸峰对应的原初电子数目为 $2700\text{eV}/26.2\text{eV} = 103$ 。也有文献中提到全能峰处对应的能量为5.9keV，逃逸峰处对应的能量为2.98keV，即全能峰在P10中对应原初电子225个，逃逸峰对应110个。该理论认为Ar原子K层位置的空缺可以由自由电子填充并且将电子的结合能进行了忽略[74]，目前后者应用较为广泛。

在探测器的正比性检测中，常用全能峰与逃逸峰的峰位比值来衡量其正比性的好坏。理论上全能峰与逃逸峰的比值为 $(E_1 + E_2)/E_1 = 1.97$ ，在实验中越接近这个值说明探测器的正比性越好[40]。通常随着阳极丝扫描电压的逐渐升高（固定GEM的工作电压），该比值会不断降低。这是因为随着电压的不断升高，增益呈指数增长，增益越大则积累的空间电荷越多。大量的阳离子会在阳极丝与下层GEM之间产生一个等效的压降，该压降会降低增益。而全能峰处产生的阳离子远远多于逃逸峰处，其压降要比逃逸峰更明显，故两者比值呈现不断下降的趋势。如果阳极丝的工作电压继续升高，两者比值将接近1，探测器将进入饱和区。

8.1.2 脉冲信号捕捉

要测量探测器的增益及能量分辨率离不开 ^{55}Fe 能谱，其所有测试信息都包含在 ^{55}Fe 能谱的拟合参数内。而要得到 ^{55}Fe 能谱，则首先要计算每一个脉冲所携带的电量，然后再将这些电量值进行一维直方图填充。为了精细研究脉冲信号，以LabVIEW为软件平台搭配示波器开发了一套脉冲信号捕获系统，可以将脉冲信号可视化、细致量化并进行具体研究。

图 8.1显示了整个基于LabVIEW的脉冲信号捕捉界面。它可以同时监控并捕捉两个示波器通道的脉冲信号，通过设置记录数据起始点可以调整所捕捉信号的头部，设置数据记录长度可以调整所捕捉信号的尾部，设置纵坐标最小值

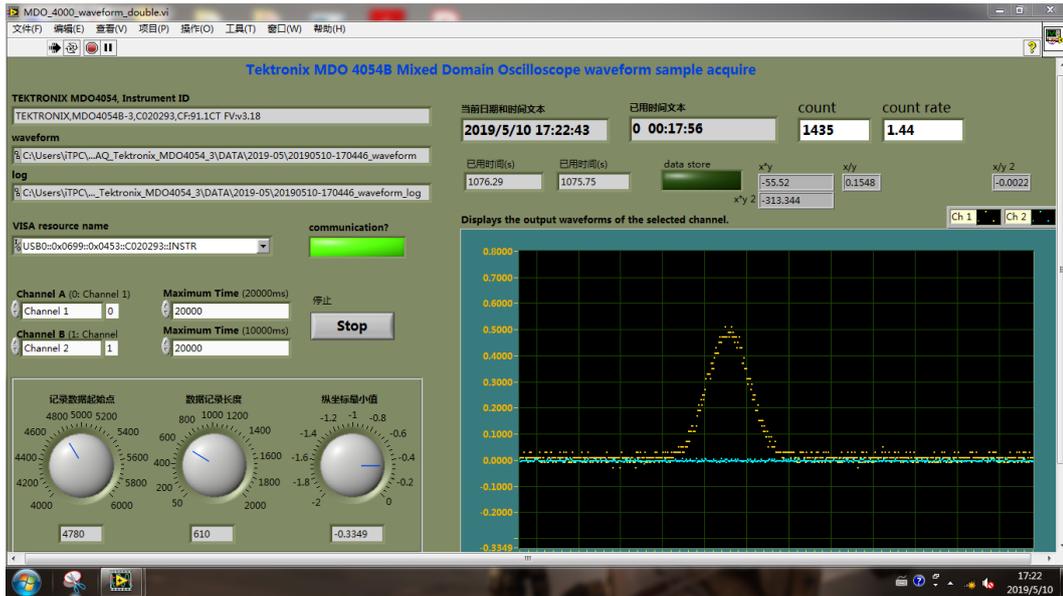


图 8.1: 基于LabVIEW的脉冲信号捕获系统操作界面

可以调整脉冲信号在整个显示屏上的位置。一个完整的脉冲信号被示波器捕捉到后实际是由若干个采样点所组成，每个点都携带有一定的电压幅值，将这些电压幅值结合每个点之间的时间信息可以将每个点的电压幅值转化为电量值，将每个点的电量值积分便可得到一个脉冲信号所携带的电量。值得注意的是，一个完整的脉冲信号所携带的电量不包含信号基线部分，所以积分电量的时候只需要积分脉冲信号的凸起部位。

图 8.2显示了通过信号捕捉系统捕捉到的一个典型的脉冲信号。可以清晰的看到整个信号由若干个采样点所组成，其中0.1mV的采样点台阶是由示波器本身的精度所致。整个脉冲信号包括左右两边的基线即本底部分，以及中间的凸起即信号部分。

下一步要对本底和信号两部分定量分析。组成信号的采样点均为相对值（相对于在示波器中设置的基线），而不是绝对值。首先需要计算本底的平均值 $V_{pedestal}$ 。在信号上升之前，把所有采样点相加然后再取平均，可以得到本底的平均大小。对于信号部分，每个采样点均需要减去 $V_{pedestal}$ 而得到该点的绝对幅值。然后再根据示波器的内阻 P_{osc} （50Ω）和示波器的采样频率 f （2.5GHz），可以得到该点所携带的电量。最后把信号部分所有的采样点携带的电量进行积分，即最终一个脉冲信号所携带的总电量 Q_{signal} 可以通过以下公式来计算：

$$Q_{signal} = \sum_i \frac{V_{i,signal} - V_{pedestal}}{P_{osc}} \cdot \frac{1}{f} \quad (8.5)$$

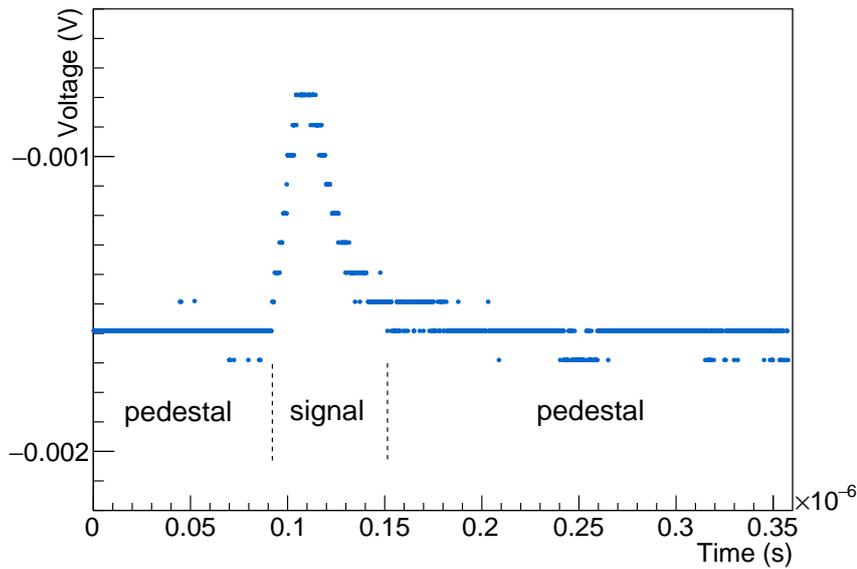


图 8.2: 由基于LabVIEW的脉冲信号捕获系统捕获到的一个典型的脉冲信号

8.1.3 ^{55}Fe 能谱分析

将获得的所有脉冲信号重复上一小节中的电量积分过程可以得到每一个脉冲所携带的电量，将这些电量填充到一维直方图中即可得到 Q_{signal} 的分布，即 ^{55}Fe 能谱。剪切掉前5%的噪音部分，如图 8.3(a)所示，可以清晰的看到两个峰，一个是位于 0.97pC 处的主峰，另一个是位于 0.48pC 处的逃逸峰。其中阳极丝工作电压为 1120V ，两层GEM的工作电压都为 255V 。主峰峰位对应的电量为 0.97pC ，而经原电离产生的225个电子所携带的电量为 $225 \times 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ ，两者相比可以得到探测器的有效增益大约为 2.6×10^4 ，同时能量分辨率可以通过计算得到为 10.8% (σ/Mean)。

在大型探测器实际运作中，高增益 (>10000) 并不受欢迎，虽然高增益使信号和噪音之间的区别更加明显，但是采用高增益的同时会带来较高的阳离子基数，因为在电子的雪崩过程中同样会产生等量的阳离子。这样即使探测器可以把阳离子回流比率限制到一个比较理想的水平，但是由于阳离子基数过大，从而导致探测器漂移区间内的阳离子密度不降反升。对于低增益的测量 (<10000) 则使用的是多道脉冲分析仪测试系统，因为示波器对触发小幅值的脉冲信号并不灵敏，而多道脉冲分析仪系统则可以做到精确测量小幅值脉冲信号。该系统经过刻度后，现在直接可以在测试中使用。保持双层GEM的工作电压为 255V 不变，把阳极丝的工作电压降至 940V ，经过通道和电量的转换后可以得到图 8.3(b)中的 ^{55}Fe 图谱。其中主峰峰位在 0.09pC ，逃逸峰峰位

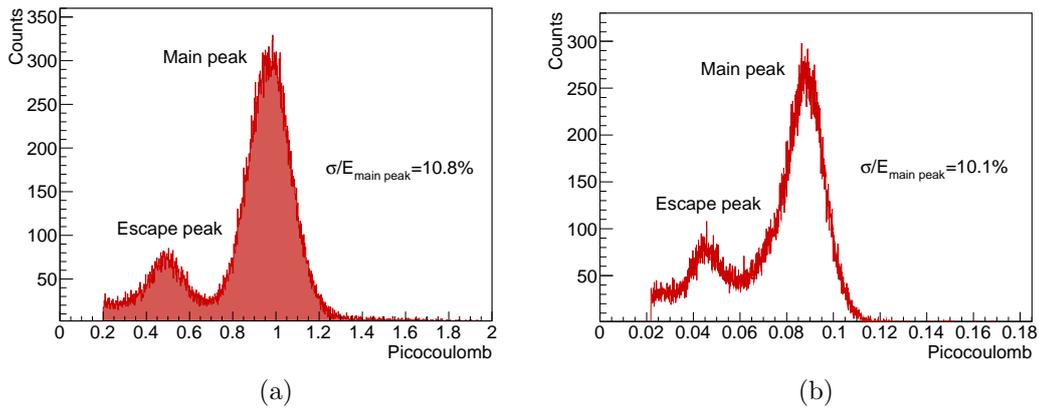


图 8.3: (a)由基于LabVIEW的脉冲信号捕获系统得到的 ^{55}Fe 图谱（阳极丝工作电压为1120V）；(b)由多道脉冲分析仪系统得到的 ^{55}Fe 图谱（阳极丝工作电压为940V）；其中双层GEM的工作电压为225V，漂移区场强 E_{drift} 为0.1kV/cm，漂移区场强 E_{transfer} 为4.0kV/cm

在0.045pC，两者相比为2且十分接近1.97，可见在低工作电压的条件下探测器具有非常好的正比性。用主峰对应的电量0.09pC除以225个电子所携带的电量为 $225 \times 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ 可以得到最终的有效增益大约为2500左右，而2500左右的有效增益与STAR TPC或者ALICE TPC处于同一量级[40, 75]。同时能量分辨率可以通过计算得到为10.1% (σ/Mean)，并且这是一个可以接收的范围。

8.1.4 有效增益及能量分辨率电压扫描

对于高增益 (>10000)，不断调整阳极丝电压，使用基于LabVIEW的脉冲信号捕获系统来不断获取相应电压下的 ^{55}Fe 图谱。而对于低增益 (<10000) 则由多道脉冲分析仪系统负责。将两部分测试结果整理合并，如图 8.4所示，最终可以得到探测器有效增益及能量分辨率与阳极丝扫描电压的关系。固定双层GEM的工作电压为255V，阳极丝工作电压的变化区间为940V至1160V。在该工作电压区间内，探测器的有效增益从2500左右增加至47000左右，且呈明显的指数增长。值得注意的是，探测器的能量分辨率与预想的不同，能量分辨率从10.1%逐渐劣化为12.0%，预想中的能量分辨率应该如同多丝正比室一样随扫描电压的增大而基本保持不变。在实际测试中则发现能量分辨率随着扫描电压的升高而逐渐劣化，该劣化效应在文献[53]中同样存在，最大的可能原因为双层交叠GEM（固定一层GEM，另一层GEM相对于第一层GEM旋转 90° ）的应用所致。在有效增益从2500左右时，能量分辨率可以达到10.1%，这个量级上的有效增益和能量分辨率已经达到了实际应用的标准。

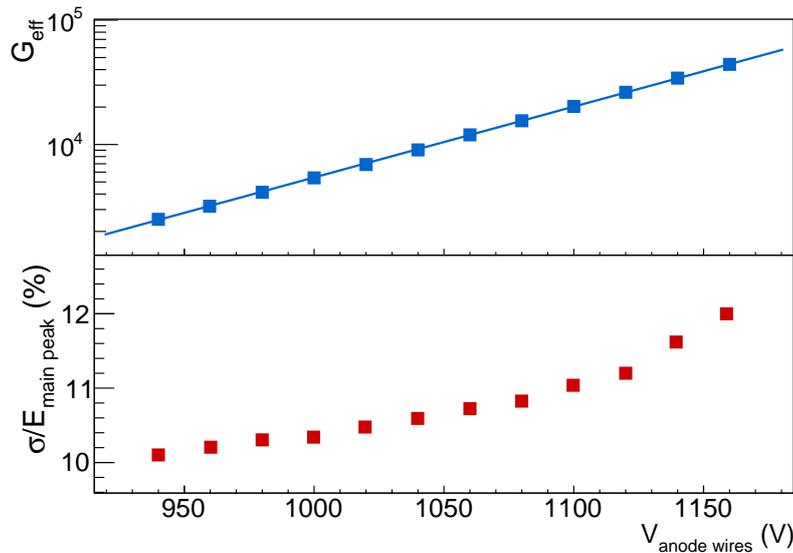


图 8.4: 有效增益及能量分辨率与阳极丝工作电压的关系。其中双层GEM的工作电压为225V, 漂移区场强 E_{drift} 为0.1kV/cm, 漂移区场强 E_{transfer} 为4.0kV/cm

8.2 阳离子回流比率测试

8.2.1 实时电流采样

测量电流时使用的仪器为皮安表 (Keithley 6482), 它具备1fA的电流分辨能力, 已经远远超过nA或pA的测量量级。皮安表本身有数据采集及显示功能, 采样频率大约为12.5Hz, 可以同时记录两个通道的电流数据。在实际的工作中依然需要借助LabVIEW的帮助将皮安表内采集到的实时数据传送至计算机终端并保存。在采集过程中还需要一根特殊的GPIB-USB-HS线缆来连接皮安表和计算机终端, 它的作用是将皮安表采集到的瞬时电流值转化为可以被计算机终端识别的数据格式, 所以在这里普通的USB线缆无法胜任。

图 8.5显示了皮安表电流探针与探测器正确的连接方式。皮安表的探针线为三轴双屏蔽线, 最外面一层屏蔽线连同皮安表一同接地, 中间一层的屏蔽线需要连接探测器外壳一同进行接地, 而最里面的信号线则直接焊接在所要测量的物体上, 比如当要测量阳极丝上的电流时便将探针直接焊接在阳极丝的固定焊点之上。经过上述配置就形成一个完整的电流测试回路, 将皮安表放置在屏蔽箱内后开始下面的测试环节。

为了对整个测试系统的本底电流量级有一个估计, 将探测器的高压电源全部打开使其处于工作状态, 冲入P10气体等待一段时间后, 将 ^{55}Fe 放射源移除,

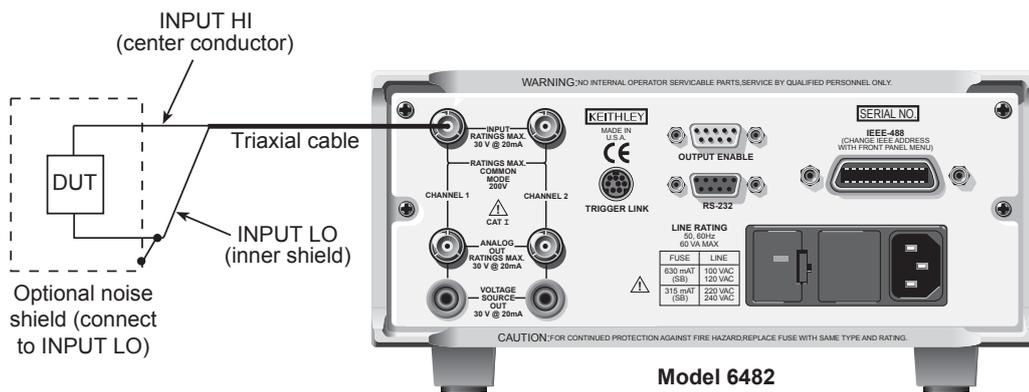


图 8.5: 皮安表在电流测试状态下与探测器连接形成的电流回路示意图

使整个探测器处于正常工作但是不受辐射的状态，如图 8.6(a)及图 8.6(b) 所示，整个系统的本底电流为32.7pA且1000个采样点呈高斯分布。

固定双层GEM的工作电压为225V，把阳极丝工作电压调节至1120V，分别对阳极丝以及阴极板上的电流进行测量。图 8.6(c)及图 8.6(d)显示了阳极丝上的电流测试结果，1000个电流测试点经过一维直方图填充后呈高斯分布，由拟合信息可得，其中Mean值为56.39nA，sigma为1.90nA。图 8.6(e)及图 8.6(f)显示了阴极板上的电流测试结果，1000个电流测试点经过一维直方图填充后呈高斯分布，Mean值为0.23nA，sigma为7.83pA。

8.2.2 阳离子回流比率电压扫描

通过对阳极丝以及阴极板上的电流测试可以得到该电压下的探测器阳离子回流比率，其计算公式为[76]：

$$IBF = \frac{I_{\text{cathode}} - I_{\text{primary}}}{I_{\text{anode}}}, \quad (8.6)$$

其中 $I_{\text{primary}} = I_{\text{anode}} / G_{\text{eff}}$ 为未经过雪崩放大的原初电子碰撞气体分子所得到的阳离子被阴极板吸收所带来的微弱电流。在有效增益2500左右时，这个电流约为阳极电流的0.04%，而随着有效增益的增加其比重还会进一步下降，所以它在通常情况下小到几乎可以忽略。

下一步开始对探测器进行阳极丝电压扫描，期间固定GEM的工作电压为255V。阳极丝工作电压从940V逐渐增大至1160V，期间有效增益从2500左右增大至44000左右。如图 8.7(a)及图 8.7(b)所示，阳极丝上的电流和阴极板上的电流几乎正比于探测器的有效增益，阳极丝上的电流从5nA左右提升至90nA左右，阴极板上的电流从0.03nA左右提升至0.35nA左右。在每一个有效增益值

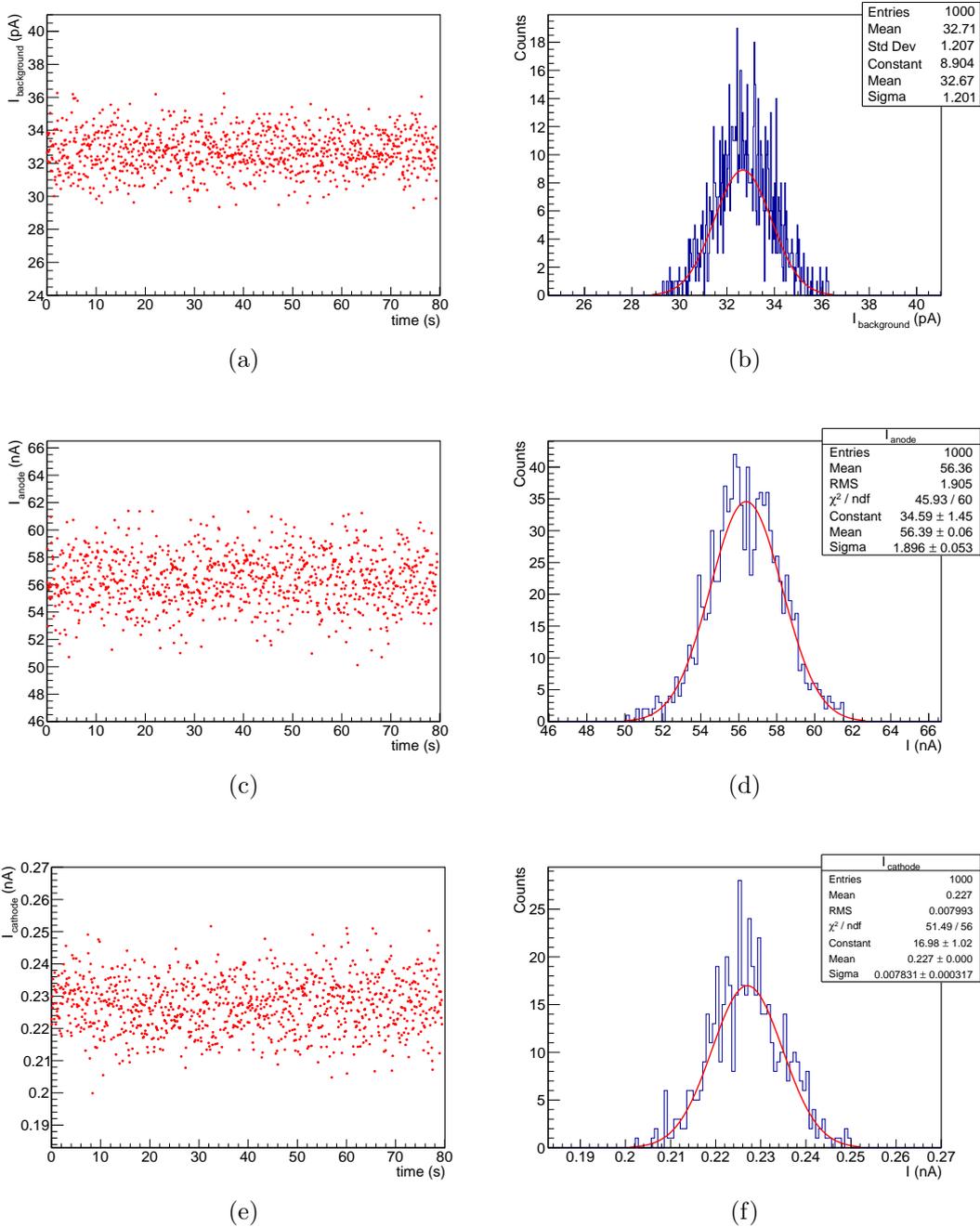


图 8.6: (a)测试系统本底电流值采样图；(b)测试系统本底电流值一维直方填充图；(c)工作电压在1120V时阳极丝上的电流采样图；(d)工作电压在1120V时阳极丝上的电流一维直方填充图；(e)工作电压在1120V时阴极板上的电流采样图；(f)工作电压在1120V 时阴极板上的电流一维直方填充图

下，通过阳极电流 I_{anode} 、阴极电流 I_{cathode} 计算出该点对应的阳离子回流比率，如图 8.7(c)所示，阳离子回流比率呈逐渐下降趋势，从有效增益20000开始下降变缓，最终在44000 左右增益的时候稳定在0.38%。在有效增益为2500左右时，探测器的阳离子回流比率为0.58%。每个电流测量值的误差提取自每个数据点1000次测量的RMS，该误差大约为3%，由于误差太小在图 8.7(a)及图 8.7(b)中几乎不可见。然后将阴极和阳极电流的误差采用误差传递的方式可以求得阳离子回流比率的误差，量级大约为5%。

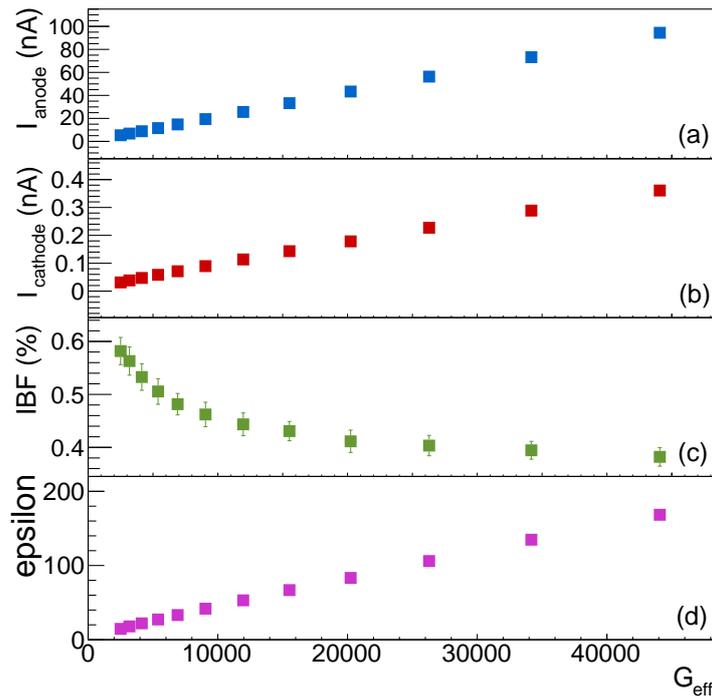


图 8.7: 阳极电流 I_{anode} 、阴极电流 I_{cathode} 、阳离子回流比率、参数 ϵ 与探测器的有效增益（阳极丝扫描电压）的变化关系

在实际计算中真正影响探测器空间内部阳离子密度的不单单是阳离子回流比率，还要考虑有效增益带来的阳离子基数问题。通常定义一个参数 $\epsilon = G_{\text{eff}} * \text{IBF}$ ，它的含义是1个进入探测器雪崩放大的原初电子最终所带来的回流的阳离子个数，这个值是估算探测器空间阳离子密度常用参数之一[77]。如图 8.7(d)所示，当有效增益从2500左右增大至44000左右时，IBF比率虽然从0.58%下降至0.38%，但是参数 ϵ 却几乎线性的从14增大至167，所以在实际应用的TPC中，几乎没有高增益的应用范例，其导致的高 ϵ 是主要原因之一。所以在实际应用中比如STAR TPC以及ALICE TPC 都把增益保持在2500左右[40, 75]。

值得注意的是，探测器的阳离子回流比率同双层GEM的交叠有很大关系，在显微镜下将两层GEM交叠好后还需要后续的装配工作通过连接件把它们固定在探测器阳极丝丝框上方，在装配过程中难免因为操作精度而影响到双层GEM的交叠状态，所以考虑到这个因素，将上述过程重复10次，每一次组装完毕后打开探测器取出GEM重新交叠后再组装，图 8.7(c)中显示的阳离子回流比率为10次重复实验中最低的一次。

8.2.3 漂移区电场对探测器空间内阳离子密度的影响

如之前所述，在现实的大型探测器实验中为了保持相对低的空间阳离子密度，有效增益不宜过大，2500是一个比较合适的选择。如图 8.8所示，固定增益为2500，对漂移区电场 E_{drift} 进行扫描，扫描区间为0.05kV/cm至4kV/cm。

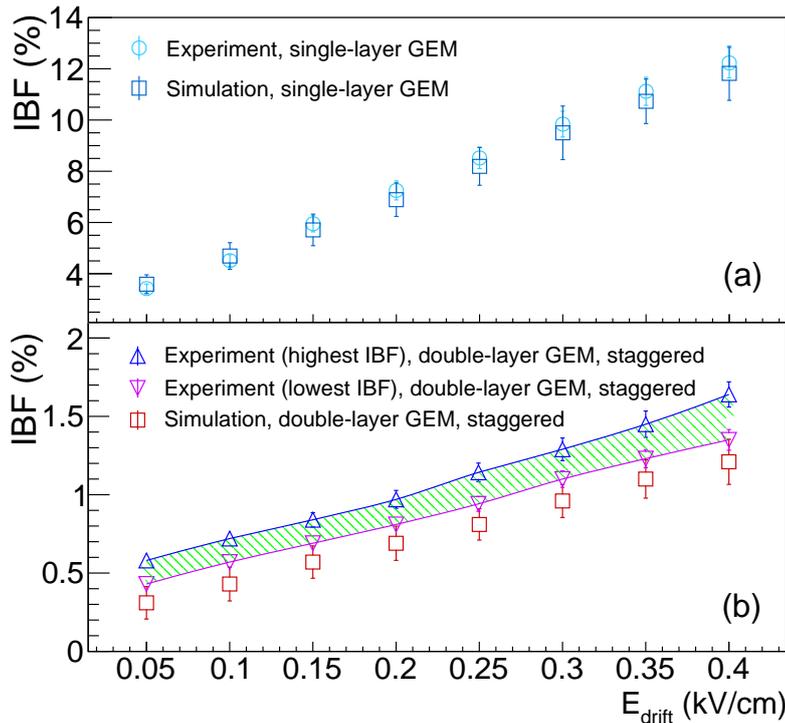


图 8.8: 单层GEM以及双层交叠GEM搭配阳极丝下阳离子回流比率与漂移电场的变化关系（含模拟值与实验值的比较）

在单层GEM搭配阳极丝的模式下，GEM的工作电压依然固定在255V，阳极丝的工作电压调节为940V以便使有效增益保持在2500。如图 8.8(a)所示，随着 E_{drift} 的逐渐增大，阳离子回流比率从3.5%增大至12%，且呈线性增长趋势，

并且模拟值与实验值显示出良好的一致性。

在双层GEM搭配阳极丝的模式下，实验值比理论值略大，这个原因是可以预料到的，因为在模拟中可以用平移法做到双层GEM完全交叠（每个孔都做到完美交叠）。而在实验中考虑到平移法较难实现，因为平移法更易受操作精度的影响，从而造成探测器阳离子回流比率的不均匀。而旋转法则受操作精度的影响较小，所以得以在实验中应用。但是其本身只能做到接近完全交叠，所以在该方法下探测器的阳离子回流比率要高于模拟中的理论最低值。如图 8.8(b)所示，在模拟中随着 E_{drift} 的逐渐增大，阳离子回流比率从0.31%增大至1.15%，且呈线性增长趋势。在实验中，10次重复拆装双层交叠GEM实验中，随着电压从0.05kV/cm升至4kV/cm，IBF最好可以达到0.45%至1.31%，最差则为0.52%至1.61%，中间的阴影带为剩余8次实验所有实验值的分布区间。在漂移区电场 E_{drift} 为0.1kV/cm时，探测器的阳离子回流比率根据装配精度的不同而在0.58%至0.71%之间浮动。

为了估算阳离子回流对空间电场畸变的影响，可以首先研究与空间电荷密度相关的各参数。空间电荷密度通常表示为[77]：

$$\rho = \frac{N_{\text{ch}} \cdot R \cdot (\epsilon + 1) \cdot n_{\text{prim}} \cdot e}{2\pi r \cdot v_{\text{ion}}} \quad (8.7)$$

其中 n_{prim} 为原初电荷数目， ϵ 为1个进入探测器雪崩放大的原初电子最终所带来的回流的阳离子个数， v_{ion} 为阳离子的漂移速度， N_{ch} 为单位横快度区间接收到的粒子数目， r 为探测器的半径位置， R 为事例率。去除掉固定参数后空间电荷密度 ρ 正比于 $(\epsilon + 1) \cdot n_{\text{prim}} / v_{\text{ion}}$ 。值得注意的是，无论在单层GEM搭配阳极丝还是双层GEM搭配阳极丝的探测器配置下，阳离子回流比率（这里也可以进一步理解为 ϵ ）均随漂移区电场 E_{drift} 而线性增加。但是需要考虑到一点，当把端盖探测器实际放到TPC中时，阳离子的漂移速度也随着电场的增大而线性增加，所以随着漂移区电场的增大，公式 8.7中的分子与分母两部分近乎同时线性增长，此时探测器内的阳离子分布处于动态平衡。

8.3 计数率测试

8.3.1 pad上的计数率

计数率是检测探测器性能的重要指标之一，它代表探测器在一定范围内接收所有入射粒子的能力。为了研究探测器的计数率，使用 ^{55}Fe 放射源来辐照所有176（22×8）个pad。将放射源金属片固定在金属腔内，腔的辐射孔径为5mm，将整个腔体放置到位于pad平面（10cm×10cm）的中心上方5.5cm处。每个pad的尺寸为15.5mm×5.5cm，间隙为0.5mm。固定示波器的信号触发阈

值，扫描阳极丝电压（940-1150V）且每次增加30V，观察pad平面中心区域的计数率，随着扫描电压的升高计数率从1500Hz提升至4500Hz，每次几乎呈线性的提升大约430Hz。如图 8.9所示，在 ^{55}Fe 辐射下，当阳极丝工作电压处于1120V时在pad平面的中心区域大约有1500Hz的最大计数率。

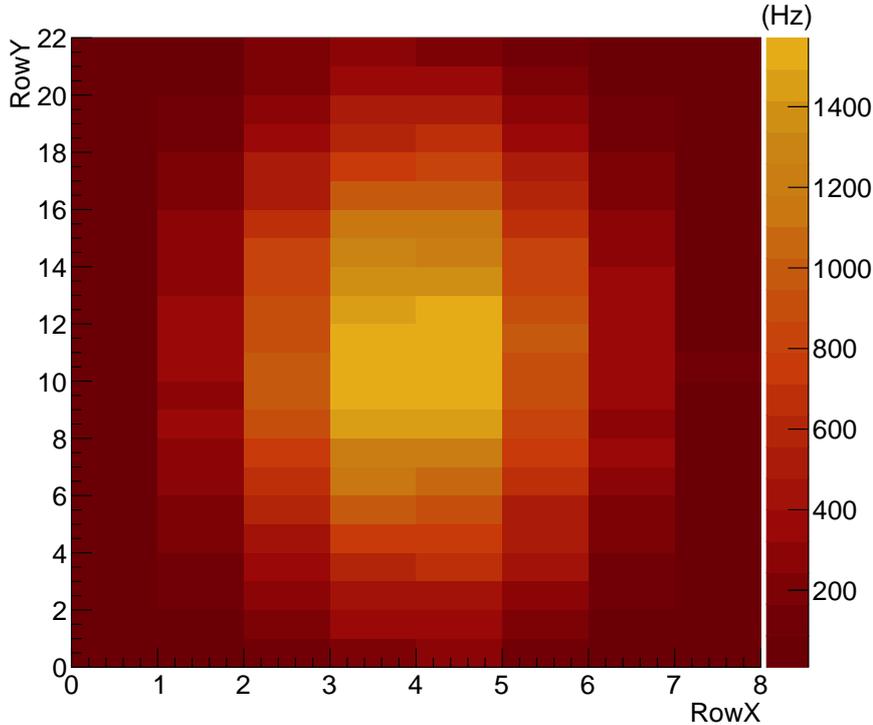


图 8.9: 探测器所有176个pad的计数率扫描

8.3.2 阳极丝上的计数率

保持双层GEM的工作电压为255V，将阳极丝工作电压调整至1120V。探测器实际有效探测面积为 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ ，以上面积可以覆盖28根阳极丝，但是在实际绕丝过程中左右两边各多绕1根，所以阳极丝实际总共有30根。之前所测得的阳极丝电流实际就是若干脉冲信号对时间的积累，所以阳极丝上计数率越高，则阳极丝上所测到的电流就越高。如图 8.10所示，在 ^{55}Fe 辐射下，跟 ^{55}Fe 放射源几乎呈垂直方向的阳极丝上计数率可达5600Hz左右，将所有丝上的脉冲信号相加，可以得到探测器在该工作电压下所有阳极丝的总计数率为64000Hz左右。

在实际工作中，探测器的有效增益是通过 ^{55}Fe 放射源以一定的频率辐射到

阳极丝面，阳极丝面通过不断积累收到的脉冲信号电量最终形成阳极丝上所测得的电流。通过该原理既可以通过皮安表来测试阳极丝上得电流来推得探测器的有效增益，也可以在探测器有效增益已知的情况下反推阳极丝上的电流，来核对皮安表的电流测试结果，公式如下[77]：

$$G_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{anode}}}{e \cdot n_{\text{prim}} \cdot R_{X\text{-ray}}} \quad (8.8)$$

其中 e 为 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ， n_{prim} 为225， $R_{X\text{-ray}}$ 为上述所测得的64000Hz， G_{eff} 在阳极丝工作电压为1120V时为44000左右，带入公式后可反推在阳极丝工作电压1120V的工作电压下，其电流反推结果约为100nA，与用皮安表测得的96nA十分接近。

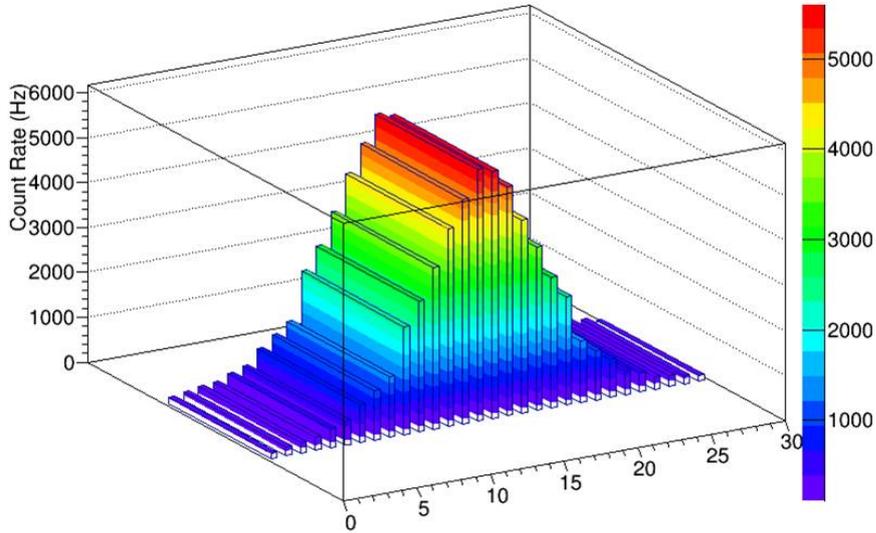


图 8.10: 探测器所有30根阳极丝的计数率扫描

8.4 空间电荷密度估算

在实际的高能物理对撞试验中，尤其在高反应率下会在探测器中产生出大量的原初电子。这些原初电子会不断碰撞气体分子而产生出大量的电子-阳离子对。由于阳离子的飘移速度远远低于电子，由于阳离子回流还会有一部分阳离子进入到漂移区中，由此引起的阳离子堆积将会扰乱TPC内部的电场并导致径迹重建时引起位置偏差。S.Rossegger和J.Thomas根据表 8.1中给出的RHIC STAR试验的基本参数，使用Hijing，Geant3和AliRoot的模拟链模拟了STAR

TPC中的空间阳离子密度分布[78]。其经验公式为:

$$\rho_{sc} = \frac{(L-z)}{L} \cdot \frac{(r_O^2 - r_I^2)}{\log(r_O/r_I)} \cdot \frac{0.01}{1.5 \cdot 10^6} \cdot \frac{R_{int}}{r^2} \quad (8.9)$$

STAR TPC (90%Ar+10%CH ₄)	
质心碰撞能量 $\sqrt{s_{NN}}$	200GeV
反应率 R_{int}	15kHz
漂移区电场 E_z	135V/cm
最大漂移距离 L_{max}	200cm
阳离子迁移率 μ_{ion}	1.6cm ² /Vs
最大漂移时间 $t_{max} = L_{max}/(E_z \cdot \mu_{ion})$	0.93s
电离能损 dE/dx	2.6e-3MeV/cm

表 8.1: 与空间阳离子密度分布有关的STAR TPC的基本参数

其中 r_O 为2.00m（外部场笼的平均半径）和 r_I 为0.48m（内部场笼的平均半径），质心能量为200GeV的Au+Au碰撞，反应率 R_{int} 为15kHz。然后将公式8.9化简为:

$$\rho_{sc} = \frac{A - Bz}{r^2} \quad (8.10)$$

其中 $A=264$ 且 $B=132$ ，在这种配置下,在靠近中心高压膜($z=0m$)的内部TPC扇区($r=0.6m$)处其空间阳离子密度将会达到 $733C/m^3/e_0$ 。值得注意的是,上面的经验公式不包括从端盖探测器回流到漂移区的阳离子,而恰恰是它们构成TPC中阳离子分布的绝大部分。原初电子在漂移区电场的作用下会向端盖探测器移动.因此,由阳离子回流导致的空间阳离子分布会在径向上表现为 $1/r^2$ 的函数,但与 z 无关。原初电子经过端盖探测器的雪崩放大,等量的阳离子会漂移回探测器的漂移区,将这部分电子沿 Z 方向积分,最终可以得到由阳离子回流所导致的空间阳离子密度。将以上两部分(由原初电子和由阳离子回流导致的空间阳离子密度)相加。最终完整的空间阳离子密度分布公式为:

$$\rho_{sc} = \frac{A - Bz + c\epsilon}{r^2} \quad (8.11)$$

其中 $\epsilon = G_{eff} \cdot IBF$,它代表由单个电子雪崩放大所带来的回流的阳离子个数。图8.11显示了最后的空间阳离子密度分布,即公式8.11。

利用上面所计算出的空间阳离子密度分布,接下来可以推导出由TPC中积累的阳离子所导致的电场扭曲,这一步可以通过使用有限元分析求解拉普拉斯方程来完成。在获得校正的场强分布后,再求解Langevin方程可以预测相应的空间点失真,以更准确的重建带电粒子的径迹[79, 80, 81]。

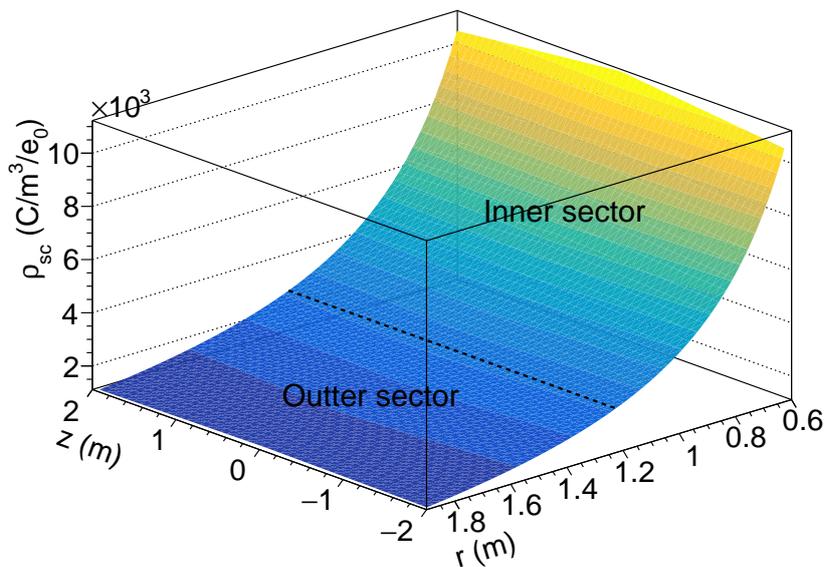


图 8.11: STAR TPC模拟空间阳离子密度分布 ($\epsilon=14$)。其端盖探测器每一面包含12个内扇区TPC和 ($r=0.60-1.25\text{m}$) 和12个外扇区TPC ($r=1.25-1.90\text{m}$)

该探测器设计方案未来在EIC上的e+p碰撞中得到实际应用的潜力是最大的，表 8.2显示了基于目前RHIC-STAR碰撞数据下对未来EIC的性能预测，可以看到，对于其中的e+p碰撞，虽然EIC的碰撞率足够高，但e+p碰撞的事例多重数却远远小于p+p碰撞，且明显低于Au+Au碰撞。所以即使考虑到有一部分通过雪崩产生的阳离子会返回到漂移空间内（每进入1个电子会返回大约14个阳离子，该部分具体内容已经在上一小节中进行了介绍），最后导致的空间电荷密度也将类似于目前RHIC-STAR上的Au+Au碰撞，所以这个量级的空间电荷密度处于可以接受的范围。

8.5 小结

本章对基于GEM和阳极丝面的新型时间投影室原型样机的性能进行了全面测试，发现其有效增益可高可低，最高在阳极丝工作电压为1120V时可以达到44000左右，最低在阳极丝工作电压为940V时可以达到2500左右。其中低有效增益符合探测器的实际应用，在有效增益2500左右时，探测器的能量分辨率可以达到10%左右，通过恰当的电场配置阳离子回流比率可以被抑制到最好的0.58%，参数 $\epsilon = G_{\text{eff}} * \text{IBF}$ 可以达到14左右。以上性能指标均达到了预期并达到了可以实际应用的层次。作为未来在EIC探测器端盖部分潜在的应用方案之

Beam species	Sqrt(s) (GeV)	Peak Luminosity (cm^{-2})	Cross section (cm^2)	Nch/d η	Track density (dNch/d η MHz)
e+p	5×250	10^{34}	10^{-28}	0.7	0.7
Au+Au	100×100	5×10^{27}	7×10^{-24}	161	6
p+p	100×100	5×10^{31}	3×10^{-26}	2	3
p+p	250×250	1.5×10^{32}	4×10^{-26}	3	18

表 8.2: 基于RHIC-STAR上Run-11的不同对撞束流下探测器内的粒子密度[82]。Nch/d η 为单位赝快度区间内带电粒子多重数

一，基于目前的探测器测试性能以及现有的STAR TPC环境，评估了它在实际工作环境下将会带来的空间阳离子密度分布情况，并且最终讨论了该探测器设计研发方案未来在EIC上应用的可能性。

第九章 总结与展望

9.1 总结

夸克是目前已知的构成物质的最基本单元，通过交换胶子来发生强相互作用从而构成各种类别的强子。由于“夸克禁闭”现象的存在，它不能被直接分离或者观测到，所以只能通过对强子的研究来间接了解夸克的特性。当物质的温度和密度都足够高时，“夸克禁闭”现象有可能处于打开状态，此时夸克可以在一个较大的范围内自由运动而形成一种新的物质形态。而这种新的物质形态被称作夸克胶子等离子体。RHIC作为世界上最大的重离子对撞机，其下属的STAR国际合作组主要的科研目标便是在高温高密环境下寻找夸克胶子等离子体存在的证据。通过控制RHIC的质心碰撞能量，可以相应的得到一定温度和重子化学势下的物质，最终实现对物质状态的扫描，以上成为寻找夸克胶子等离子体的主要实验手段。自2009年开始，RHIC STAR开始了一期能量扫描计划，并于2014年完成。期间获得了许多宝贵的实验结果。接下来RHIC STAR计划在2019-2020年开展二期能量扫描计划。二期能量扫描计划要求更高的数据统计量（相比较一期提升20倍），并计划在较低的能量段下进行扫描。为了达到能量扫描计划二期所预期的各项物理性能要求，STAR国际合作组计划对整个探测器进行升级。而iTTPC升级项目作为此次STAR 探测器升级的重要组成部分，计划对探测器端盖两侧总共24个内扇区多丝正比室进行更换升级，其主要升级内容为：（1）重新设计pad平面，pad覆盖的行数由之前的13行提升至40行，其覆盖率由升级前的20%提升至升级后的100%。（2）升级相应的电子学与升级后的iTTPC进行匹配，增加其读出通道并提升其读出速度、能量分辨率等。（3）更新其老旧阳极丝、阴极丝、门极丝及相应的电子元件。

经过对iTTPC升级项目每个环节进行详细分工并计算工期要求后，开发了绕丝系统及丝张力测试系统来确保之后的iTTPC量产工作可以在高效率、高精度的前提下完成。按照既定的计划，自2017年夏季开始，iTTPC进入了正式的批量生产阶段。整个量产过程中每一步之间环环相扣，每一个环节都要达到相应的技术标准。经过质检合格的探测器还要进入最后的性能测试阶段。性能测试分为阳极丝读出性能测试及pad读出性能测试。为此搭建了基于 ^{55}Fe 及高频X射线管的测试平台。最终测试结果表明，量产制作的iTTPC多丝正比室其能量分辨率处于10%量级。通过对每一根丝的扫描还可以得到增益的均匀性，并且均好于2%。对pad读出的测试环节则用到了STAR DAQ测试系统。在位置分辨率测试环节则用到了高频X射线，通过扫描法（共扫描27个点）得到探测器的位置

分辨率为2.545mm，单pad与阳极丝信号的最大占比为30.47%。STAR iTPC升级项目结束后，全部探测器运往BNL并且在STAR探测器上进行安装调试以迎接马上要到来的二期能量扫描计划。

考虑到未来对撞机（比如EIC）的发展必然对与之相匹配的探测器提出了更高的要求，传统的多丝正比室由于其特殊的开关门机制导致探测器周期性的处于非读出状态，在未来高亮度、高对撞率的环境下已经不再适用。作者在STAR iTPC升级项目中获得了大量的宝贵经验，借此提出一种新型时间投影室：保留阳极丝，因为它可以在较高的工作电压下稳定工作并提供较大的增益，且寿命长造价低。对于阴极丝和阳极丝则直接用微结构气体探测器取代，考虑到多方面因素最终确定了阳极丝搭配双层标准气体电子倍增器的配置。撤换掉阴极丝以及门极丝后，传统的开关门机制不复存在，探测器可以实现连续读出，但是也带来了阳离子回流的问题，该问题是上述设计方案是否可行的关键指标之一。

在APDL及Garfield++模拟的帮助下，首先对单层GEM及双层GEM的电子及阳离子的传输规律、电子的收集效率、电子的提取效率、增益等重要属性进行了模拟并得到了量化结果。经过以上的模拟总结并摸索出了一部分电场的设置规律。其中的仿STAR TPC环境变量参数（气体组分、温度、气压等）可以使探测器在该配置下稳定工作。在最终对探测器实际配置的模拟中，漂移区场强设置为1kV/cm，传输区场强设置为4kV/cm，阳极丝工作电压设置为1120V，两层交叠GEM的工作电压设置为255V。在以上配置下，探测器在整个模拟过程中表现稳定，并没有出现增益异常的情况，并且可以将阳离子回流比率压制到较低的水准。

经过对探测器进行的全面性能测试，发现其有效增益可高可低，固定双层GEM的工作电压为255V，最高在阳极丝工作电压为1120V时可以达到44000左右，最低在阳极丝工作电压为940V时可以达到2500左右。在实际应用中，2500左右的有效增益最为常见，比如目前正在运行的STAR TPC以及ALICE TPC。当有效增益处在2500左右时，探测器的能量分辨率可以达到大约10%的水准，通过交叠两层GEM以及恰当的电场配置可以使阳离子回流比率被进一步抑制到最好的0.58%，以上均衡的性能表现均证明了这种新型时间投影室方案的可行性，并可以作为在未来对撞机探测器的端盖部分替代多丝正比室的优秀方案之一。

9.2 展望

借由STAR iTPC项目，山东大学高能物理实验室搭建起了一大批硬件设施，对探测器的各种测试原理及数据分析技术进行了深入研究，为将来的发展

打下了良好的基础。目前新的STAR TPC前端探测器项目已经拉开帷幕，将借由ATLAS sTGC相关技术对其进行研发，目前第一个原型样机正在制作过程中并且相关的测试系统也在搭建。经过前端探测器升级后STAR TPC预计将会获得更高的粒子重建效率。而对于TPC端盖探测器的研究即本文中GEM搭配阳极丝的新型时间投影室方案，作者尝试了双层GEM搭配阳极丝并得到了不错的阳离子抑制结果，未来可以在这个基础上尝试三层GEM搭配阳极丝，在正确的配置下预计将会获得更好的阳离子回流抑制能力。对于三层GEM的交叠方式，可以尝试三层全平移方式或者全旋转方式以及平移与旋转方式混合使用。在这种情况下，电子及阳离子的传输过程则更加的复杂，要精确的重建这个过程依然离不开Garfield++模拟的帮助。而对于GEM的工作电压，本文中一直采用了固定GEM压差调节阳极丝电压的方式来调节探测器的增益，未来可以尝试将阳极丝的工作电压固定来调节GEM的压差来研究探测器增益及能量分辨率的变化规律。考虑到标准GEM其复杂的制作工艺及易损坏性，在国内已经逐渐的被易于生产的THGEM所取代，目前在国内有多家科研单位具备量产技术，而THGEM搭配阳极丝的方案同样值得期待。同时随着光刻玻璃技术的兴起，G-GEM也有相当大的潜力成为未来的主流微结构气体探测器。MicroMegas现在应用的已经较为广泛，MicroMegas+GEM或者THGEM的配置已经有较完备的研究方案，而作为MicroMegas的衍生物，MicroMegas类网状结构在国内多家科研单位也开启了相关的研究，所以MicroMegas类网状结构搭配阳极丝的方案也是一个将来可以进行研发的课题之一。具有连续读出功能及较好的抑制阳离子回流的能力只是未来对撞机比如EIC或者CEPC对探测器的端盖装置提出的诸多要求中的其中两项，未来还需要根据具体的对撞机及整体探测器的设计参数比如探测器的几何结构和机械尺寸、端盖探测器模块的大小、电子学的性能等做出更加详尽的研究。

参考文献

- [1] M.Harrison, *et al.*, RHIC project overview, Nucl. Instr. Meth. A, 499(2003), 235-244.
- [2] H.Hahn, *et al.*, The RHIC design overview, Nucl. Instr. Meth. A, 499(2003), 245-263.
- [3] K.H.Ackermann, *et al.*, STAR detector overview, Nucl. Instr. Meth. A, 499(2003), 624-632.
- [4] E.G.Judd, *et al.*, The evolution of the STAR Trigger System, Nucl. Instr. Meth. A, 902(2003), 228-237.
- [5] C.Adler, *et al.*, The RHIC zero-degree calorimeters, Nucl. Instr. Meth. A, 499(2003), 433-436.
- [6] Yifei Xu, *et al.*, Physics performance of the STAR zero degree calorimeter at relativistic heavy ion collider, Nucl.Sci.Tech., 27(2016), 126.
- [7] W.J.Llope, *et al.*, The STAR Vertex Position Detector, Nucl. Instr. Meth. A, 759(2014), 23-28.
- [8] M.Beddo, *et al.*, The STAR Barrel Electromagnetic Calorimeter, Nucl. Instr. Meth. A, 499(2003), 725-739.
- [9] C.E.Allgower, *et al.*, The STAR endcap electromagnetic calorimeter, Nucl. Instr. Meth. A, 499(2003), 740-750.
- [10] M.Beddo, *et al.*, The large-area time-of-flight upgrade for STAR, Nucl. Instr. Meth. A, 241(2005), 306-310.
- [11] F.Geurts, *et al.*, Performance of the prototype MRPC detector for STAR, Nucl. Instr. Meth. A, 533(2004), 60-64.
- [12] B.Bonner, *et al.*, A multigap resistive plate chamber prototype for time-of-flight for the STAR experiment at RHIC, Nucl. Instr. Meth. A, 478(2002), 176-179.

- [13] The STAR collaboration, Perspectives of a Midrapidity Dimuon Program at RHIC: A Novel and Compact Muon Telescope Detector, STAR Note 0626.
- [14] Marx J.N., *et al.*, The time projection chamber, Phys. Today 31, 10, 46(1978), 46-53.
- [15] M.Anderson, *et al.*, The STAR time projection chamber: a unique tool for studying high multiplicity events at RHIC, Nucl. Instr. Meth. A, 499(2003), 659-678.
- [16] K.H.Ackermann, *et al.*, The STAR Time Projection Chamber, Nuclear Physics A, 661(1999), 681-585.
- [17] The STAR Collaboration, Partonic Flow and Φ -Meson Production in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$, Phys. Rev. Lett., 99, 112301(2007).
- [18] P.K.Kovtun, *et al.*, Viscosity in Strongly Interacting Quantum Field Theories from Black Hole Physics, Phys. Rev. Lett., 94, 111601(2005).
- [19] E.Retinskaya, *et al.*, Directed Flow at Midrapidity in $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ P-b+Pb Collisions, Phys. Rev. Lett., 108, 252302(2012)
- [20] The STAR collaboration, Studying the Phase Diagram of QCD Matter at RHIC, STAR Note 0598.
- [21] K.H.Ackermann, *et al.*, STAR Results from the RHIC Beam Energy Scan-I, Nuclear Physics A, 904-905(2013), 656-263.
- [22] The STAR collaboration, STAR Collaboration Decadal Plan, STAR Note 0646.
- [23] Introduction to NI-DAQmx, <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/zhs/>
- [24] NI USB-6343 specifications, <http://www.ni.com/pdf/manuals/374567d.pdf>
- [25] National Instruments Corporation, LabVIEW Intermediate I: Successful Development Practices Course Manual, 2007.
- [26] R.Bitter, *et al.*, LabVIEW Advanced Programming Techniques, CRC Press Inc, 2006.

- [27] J.Conway, *et al.*, A Software Engineering Approach to LabVIEW, Prentice Hall, 2003.
- [28] Y.Li, *et al.*, PID control system analysis and design, IEEE Control Systems Magazine, 26(2006), 32-41.
- [29] X.Wang, *et al.*, Design and implementation of wire tension measurement system for MWPCs used in the STAR iTPC upgrade, Nucl. Instr. Meth. A, 859(2017), 90-94.
- [30] M.Calvetti, *et al.*, A computer-aided system for MWPC wire tension control, Nucl. Instr. Meth. A, 174(1980), 285-289.
- [31] P.Ciambrone, *et al.*, Automated wire tension measurement system for LHCb muon chambers, Nucl. Instr. Meth. A, 545(2005), 156-163.
- [32] C.E.Shannon, *et al.*, Communication in the Presence of Noise, Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 37(1949), 10-21.
- [33] J.S.Walker, Fast Fourier Transforms, CRC Press Inc, 1996.
- [34] H.Wieman, *et al.*, STAR TPC at RHIC, IEEE Transactions on Nuclear Science, 44(1997), 671-678.
- [35] The STAR collaboration, STAR Conceptual design report, STAR Note 0499. <https://drupal.star.bnl.gov/STAR/files/StarCDR.pdf>
- [36] The STAR collaboration, STAR Project Conceptual Design Report Update, STAR Note 0613. <https://drupal.star.bnl.gov/STAR/files/CDRUpdate.pdf>
- [37] The STAR collaboration, A Proposal for STAR Inner TPC Sector Upgrade (iTPC), STAR Note 0619.
- [38] Blum, Riegler, Rolandi, Particle Detection with Drift Chambers, Springer, 2008.
- [39] F.Sauli, Principles of operation of proportional and drift chambers, CERN 77-09, 1977.
- [40] Fuwang Shen, *et al.*, MWPC prototyping and performance test for the STAR inner TPC upgrade, Nucl. Instr. Meth. A, 896(2018), 90-95.

- [41] The STAR collaboration, Investigation of the STAR FEE Response to the FEE Pulser at the TPC System Test, STAR Note 0324. <https://drupal.star.bnl.gov/STAR/files/starnotes/sn0324.ps.gz>
- [42] The STAR collaboration, Studies of Several Wire and Pad Configurations for the STAR TPC, STAR Note 0263. <https://drupal.star.bnl.gov/STAR/files/starnotes/sn0263.pdf>
- [43] The STAR collaboration, The STAR Beam Use Request for Runs 19 and 20, STAR Note 0696.
- [44] E.C.Aschenauer, *et al.*, Electron Ion Collider: The Next QCD Frontier, 2012.
- [45] S.Tangwancharoen, *et al.*, A gating grid driver for time projection chambers, Nucl. Instr. Meth. A, 853(2017), 44-52.
- [46] J.Thomas, *et al.*, Gated Grid Studies with the STAR TPC, Division of Nuclear Physics Fall Meeting, 2017.
- [47] 谢一冈等, 粒子探测器与数据获取, 科学出版社, 2003.
- [48] 旺晓莲等, 粒子探测技术, 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [49] F.Sauli, GEM: a new concept for electron amplification in gas detectors, Nucl. Instr. Meth. A, 386(1997), 531-534.
- [50] R.Bouclier, *et al.*, New observations with the gas electron multiplier (GEM), Nucl. Instr. Meth. A, 396(1997), 50-56.
- [51] C.Lippmann, *et al.*, A continuous read-out TPC for the ALICE upgrade, Nucl. Instr. Meth. A, 824(2016), 543-547.
- [52] P.Gasik, *et al.*, Building a large-area GEM-based readout chamber for the upgrade of the ALICE TPC, Nucl. Instr. Meth. A, 845(2017), 222-225.
- [53] S.Aiola, *et al.*, Combination of two Gas Electron Multipliers and a Microegas as gain elements for a time projection chamber, Nucl. Instr. Meth. A, 834(2016), 149-157.
- [54] A.Breskin, *et al.*, A concise review on THGEM detectors, Nucl. Instr. Meth. A, 598(2009), 149-157.

- [55] A.Breskin, *et al.*, The THGEM: A thick robust gaseous electron multiplier for radiation detectors, Nucl. Instr. Meth. A, 623(2010), 149-157.
- [56] H.Takahashi, *et al.*, Development of a glass GEM, Nucl. Instr. Meth. A, 724(2013), 149-157.
- [57] Y.Mitsuya, *et al.*, Development of large-area glass GEM, Nucl. Instr. Meth. A, 795(2015), 149-157.
- [58] S.Yang, *et al.*, Cosmic Ray Test of Mini-drift Thick Gas Electron Multiplier Chamber for Transition Radiation Detector, Nucl. Instr. Meth. A, 785(2015), 33-39
- [59] M.Berger, *et al.*, A large ungated TPC with GEM amplification, Nucl. Instr. Meth. A, 869(2017), 180-204.
- [60] P.Gasik, *et al.*, Charge density as a driving factor of discharge formation in GEM-based detectors, Nucl. Instr. Meth. A, 870(2017), 116-122.
- [61] D.Jeanne, *et al.*, High energy particle identification using multilayer proportional counters, Nucl. Instr. Meth. A, 111(1973), 287-300.
- [62] C.Grupen, *et al.*, Particle Detectors, Cambridge University Press, 2011.
- [63] E.Segre, Experimental Nuclear Physics, New York:Wiley, 1953.
- [64] L.Kotchenda, *et al.*, STAR TPC gas system, Nucl. Instr. Meth. A, 499(2003), 703-712.
- [65] The STAR collaboration, Gas System Operation at BNL, STAR Note 0270. <https://drupal.star.bnl.gov/STAR/files/starnotes/sn0270.ps.gz>
- [66] 龚曙光, 谢桂兰, 黄云清, ANSYS参数化编程与命令手册, 机械工业出版社, 2009.
- [67] H.Schindler, Garfield++ User Guide, 2017.
- [68] O.Bouianov, *et al.*, Progress in GEM simulation, Nucl. Instr. Meth. A, 450(2000), 277-287.
- [69] P.Gasik, *et al.*, Charge density as a driving factor of discharge formation in GEM-based detectors, Nucl. Instr. Meth. A 870 (2017), 116-122.

- [70] D.Mörmann, *et al.*, Evaluation and reduction of ion back-flow in multi-GEM detectors, Nucl. Instr. Meth. A, 516(2004), 315-326.
- [71] H.Natal da Luz, *et al.*, Ion backflow studies with a triple-GEM stack with increasing hole pitch, JINST 13(2018), P07025.
- [72] F.Sauli, The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications, Nucl. Instr. Meth. A, 805(2016), 2-24.
- [73] 王临州, 李黎力, 正比室一些特性的研究, 核技术, 1984年第1期, 26-31.
- [74] S.Behrends, *et al.*, Properties of argon-ethane/methane mixtures for use in proportional counters, Nucl. Instrum. Meth. A, 188(1981), 521-534.
- [75] Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Time Projection Chamber, CERN-LHCC-2013-020, ALICE-TDR-016.
- [76] F. Jeanneau, *et al.*, Ion back-flow gating in a micromegas device, Nucl. Instr. Meth. A, 623(2010), 94-96.
- [77] M. Ball, *et al.*, Ion backflow studies for the ALICE TPC upgrade with GEMs, 2014 JINST 9 C04025.
- [78] S.Rossegger, *et al.*, Space-charge effects in the ALICE TPC: a comparison between expected ALICE performance and current results from the STAR TPC, ALICE Internal Note, 2011, ALICE-INT-2010-017.
- [79] F.V.Böhmer, *et al.*, Simulation of space-charge effects in an ungated GEM-based TPC, Nucl. Instr. Meth. A, 719(2013), 101-108.
- [80] J.Thomas, *et al.*, The Langevin equation expanded to 2nd order and comments on using the equation to correct for space point distortions in a TPC, ALICE Internal Note, 2010, ALICE-INT-2010-016.
- [81] S.Rossegger, *et al.*, Analytical solutions for space charge fields in TPC drift volumes, Nucl. Instr. Meth. A, 632(2011), 52-58.
- [82] Zhangbu Xu, *et al.*, GEM based TRD for Identifying electrons at EIC, R&D proposal for an Endcap TOF and TRD for Identifying electrons at EIC, 2014.

攻读博士学位期间发表的论文

- Shuai Wang, *et al.*, Studies on ion back-flow of Time Projection Chamber based on GEM and anode wire grid, Nucl.Instrum.Methods A, Vol.940 (2019), 410-416.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.06.039>

- Shuai Wang, *et al.*, MWPC Prototyping and Testing for STAR Inner TPC Upgrade, International Journal of Modern Physics, Vol.46 (2018), 1860079.

DOI: <https://doi.org/10.1142/S2010194518600790>

攻读博士学位期间参加的科研工作

- STAR iTPC升级项目（中美合作）

2014.9-2015.9 参与实验室的建设及相关硬件平台搭建

2015.9-2017.7 参与iTPC小型样机及全尺寸样机的制作及测试

2017.7-2018.9 参与iTPC的整个量产过程，负责绕丝及丝张力测试环节，参与部分探测器丝端读出的批量性能测试，独立完成探测器pad读出的性能测试

- 对基于气体电子倍增器及阳极丝面的新型时间投影室的研发

2016.9-2017.9 完成探测器及相关硬件系统的搭建

2017.9-2018.4 完成对探测器前期的性能模拟

2018.4-2018.6 完成对探测器后期的性能测试

附录 A 重要词汇中英文对照

- 相对论重离子对撞机 (Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC)
零度量能器 (Zero Degree Calorimeter, ZDC)
束流计数器 (Beam-Beam Counter, BBC)
顶点位置探测器 (Vertex Position Detector, VPD)
电磁量能器 (Electromagnetic Calorimeter, EMC)
飞行时间探测器 (Time of Flight detector, TOF)
 μ 子望远镜探测器 (Muon Telescope Detector, MTD)
前端介子谱仪 (Forward Meson Spectrometer, FMS)
时间投影室 (Time Projection Chamber, TPC)
粒子物理学中的标准模型 (Standard Model, SM)
量子色动力学 (Quantum ChromoDynamics, QCD)
夸克胶子等离子体 (Quark-Gluon Plasma, QGP)
相变临界点 (Critical Point, CP)
能量扫描计划 (Beam Energy Scan, BES)
多道脉冲分析仪 (MultiChannel Analyser, MCA)
前端电子学 (Front End Electronic, FEE)
pad响应功能 (Pad Response Function, PRF)
电子-离子对撞机 (Electron Ion Collider, EIC)
美国布鲁克海文国家实验室 (Brookhaven National Laboratory, BNL)
杰斐逊国家实验室 (Jefferson Lab, JLab)
连续电子束加速器 (Continuous Electron Beam Accelerator Facility, CEBAF)
中国兰州重离子加速器研究装置 (Heavy Ion Research Facility of Lanzhou, HIRFL)
能量回收加速器 (Energy Recovery LINAC, ERL)
相干电子冷却器 (Coherent electron Cooling, CeC)
微结构气体探测器 (Micro-Pattern Gas Detectors, MPGDs)
微条气体室 (Micro-Strip Gas Chamber, MSGC)
微网气体结构探测器 (Micro-Mesh gaseous structure, MicroMegas)
气体电子倍增器 (Gas Electron Multiplier, GEM)

厚型气体电子倍增器 (Thick Gas Electron Multiplier, THGEM)

玻璃型气体电子倍增器 (Glass Gas Electron Multiplier, G-GEM)

ANSYS参数化设计编程 (ANSYS Parameter Design Language, APDL)

有限元分析法 (Finite Element Analysis, FEA)

附录 B 基于APDL的建模代码

B.1 双层非交叠GEM

```

!清理内存并开启一个新的程序
/CLEAR,START
!定义文件名称
/FILNAME,gem,1
!定义标题
/TITLE,Double-layer GEM (non-staggered mode)
!进入PREP-7前处理器
/PREP7
!激活p-method功能
/PMETH,OFF,1
!指定电磁场分析功能
KEYW,PR-ELMAG,1
KEYW,MAGELC,1
!定义一个三维10结点固体
ET,1,SOLID123
!定义各项材料的介电常数和电阻率，然后对其进行编号归类。
MP,PERX,1,1e10
MP,RSVX,1,0 !METAL
MP,PERX,2,3.5 !KAPTON
MP,PERX,3,1 !GAS
pitch=140
!建立下层GEM
BLOCK,0,pitch,0,pitch*sqrt(3),0,50
BLOCK,0,pitch,0,pitch*sqrt(3),50,55
BLOCK,0,pitch,0,pitch*sqrt(3),0,-5
CONE,25,35,25,50,0,360
CONE,35,25,0,25,0,360
CYLIND,35,,50,55,0,360

```

CYLIND,35,,0,-5,0,360
WPOFFS,pitch/2,pitch*sqrt(3)/2,0
CONE,25,35,25,50,0,360
CONE,35,25,0,25,0,360
CYLIND,35,,50,55,0,360
CYLIND,35,,0,-5,0,360
WPOFFS,-(pitch/2),-(pitch/2)*sqrt(3),0
WPOFFS,0,pitch*sqrt(3),0
CONE,25,35,25,50,0,360
CONE,35,25,0,25,0,360
CYLIND,35,,50,55,0,360
CYLIND,35,,0,-5,0,360
WPOFFS,0,-pitch*sqrt(3),0
WPOFFS,pitch,0,0
CONE,25,35,25,50,0,360
CONE,35,25,0,25,0,360
CYLIND,35,,50,55,0,360
CYLIND,35,,0,-5,0,360
WPOFFS,-pitch,0,0
WPOFFS,pitch,pitch*sqrt(3),0
CONE,25,35,25,50,0,360
CONE,35,25,0,25,0,360
CYLIND,35,,50,55,0,360
CYLIND,35,,0,-5,0,360
WPOFFS,-pitch,-pitch*sqrt(3),0
VSBV,1,4,,DELETE,DELETE
VSBV,24,5,,DELETE,DELETE
VSBV,1,8,,DELETE,DELETE
VSBV,4,9,,DELETE,DELETE
VSBV,1,12,,DELETE,DELETE
VSBV,4,13,,DELETE,DELETE
VSBV,1,16,,DELETE,DELETE
VSBV,4,17,,DELETE,DELETE

VSBV,1,20,,DELETE,DELETE
 VSBV,4,21,,DELETE,DELETE
 VSBV,2,6,,DELETE,DELETE
 VSBV,4,10,,DELETE,DELETE
 VSBV,2,14,,DELETE,DELETE
 VSBV,4,18,,DELETE,DELETE
 VSBV,2,22,,DELETE,DELETE
 VSBV,3,7,,DELETE,DELETE
 VSBV,2,11,,DELETE,DELETE
 VSBV,3,15,,DELETE,DELETE
 VSBV,2,19,,DELETE,DELETE
 VSBV,3,23,,DELETE,DELETE
 !建立上层GEM
 WPOFFS,0,0,2000
 BLOCK,0,pitch,0,pitch*sqrt(3),0,50
 BLOCK,0,pitch,0,pitch*sqrt(3),50,55
 BLOCK,0,pitch,0,pitch*sqrt(3),0,-5
 CONE,25,35,25,50,0,360
 CONE,35,25,0,25,0,360
 CYLIND,35,,50,55,0,360
 CYLIND,35,,0,-5,0,360
 WPOFFS,pitch/2,pitch*sqrt(3)/2,0
 CONE,25,35,25,50,0,360
 CONE,35,25,0,25,0,360
 CYLIND,35,,50,55,0,360
 CYLIND,35,,0,-5,0,360
 WPOFFS,-(pitch/2),-(pitch/2)*sqrt(3),0
 WPOFFS,0,pitch*sqrt(3),0
 CONE,25,35,25,50,0,360
 CONE,35,25,0,25,0,360
 CYLIND,35,,50,55,0,360
 CYLIND,35,,0,-5,0,360
 WPOFFS,0,-pitch*sqrt(3),0

WPOFFS,pitch,0,0
CONE,25,35,25,50,0,360
CONE,35,25,0,25,0,360
CYLIND,35,,50,55,0,360
CYLIND,35,,0,-5,0,360
WPOFFS,-pitch,0,0
WPOFFS,pitch,pitch*sqrt(3),0
CONE,25,35,25,50,0,360
CONE,35,25,0,25,0,360
CYLIND,35,,50,55,0,360
CYLIND,35,,0,-5,0,360
WPOFFS,-pitch,-pitch*sqrt(3),0
VSBV,3,7,,DELETE,DELETE
VSBV,27,8,,DELETE,DELETE
VSBV,3,11,,DELETE,DELETE
VSBV,7,12,,DELETE,DELETE
VSBV,3,15,,DELETE,DELETE
VSBV,7,16,,DELETE,DELETE
VSBV,3,19,,DELETE,DELETE
VSBV,7,20,,DELETE,DELETE
VSBV,3,23,,DELETE,DELETE
VSBV,7,24,,DELETE,DELETE
VSBV,5,9,,DELETE,DELETE
VSBV,7,13,,DELETE,DELETE
VSBV,5,17,,DELETE,DELETE
VSBV,7,21,,DELETE,DELETE
VSBV,5,25,,DELETE,DELETE
VSBV,6,10,,DELETE,DELETE
VSBV,5,14,,DELETE,DELETE
VSBV,6,18,,DELETE,DELETE
VSBV,5,22,,DELETE,DELETE
VSBV,6,26,,DELETE,DELETE
!建立阴极

```
WPOFFS,0,0,-2000
WPOFFS,0,0,7000
BLOCK,0,140,0,140,0,5
!建立阳极
WPOFFS,0,0,-7000
WPOFFS,0,0,-4000
BLOCK,0,140,0,140,0,-5
WPOFFS,0,0,4000
!建立填充气体
BLOCK,0,140,0,140,7005,-4005
VSBV,9,8,,,KEEP
VSBV,10,2,,,KEEP
VSBV,9,1,,,KEEP
VSBV,10,4,,,KEEP
VSBV,9,5,,,KEEP
VSBV,10,3,,,KEEP
VSBV,9,7,,,KEEP
VSBV,10,6,,,KEEP
!粘合所有模型
VGLUE,ALL
!定义材质
VSEL,S,VOLU,,8,10,2
VATT,1,,1
VSEL,S,VOLU,,11,12
VATT,1,,1
VSEL,S,VOLU,,6,13,7
VATT,1,,1
VSEL,S,VOLU,,1,3,2
VATT,2,,1
VSEL,S,VOLU,,14
VATT,3,,1
!显示所有体编号
VSEL,S,VOLU,,ALL
```

```
VLIST,ALL
!定义电位
VSEL,S,VOLU,,6
ASLV,S
DA,ALL,VOLT,-1550
VSEL,S,VOLU,,13
ASLV,S
DA,ALL,VOLT,-1500
VSEL,S,VOLU,,12
ASLV,S
DA,ALL,VOLT,-1250
VSEL,S,VOLU,,11
ASLV,S
DA,ALL,VOLT,-850
VSEL,S,VOLU,,10
ASLV,S
DA,ALL,VOLT,-600
VSEL,S,VOLU,,8
ASLV,S
DA,ALL,VOLT,0
!网格化模型
MSHKEY,0
SMRT,1
VSEL,S,VOLU,,1,3,2
ASLV,S
VMESH,ALL
VSEL,S,VOLU,,14
ASLV,S
VMESH,ALL
!计算求解
/SOLU
SOLVE
!导出求解文件
```

```
/POST1
/OUTPUT,field,lis
PRNSOL
/OUTPUT
/OUTPUT,NLIST,lis
NLIST,,,,COORD
/OUTPUT
/OUTPUT,MPLIST,lis
MPLIST
/OUTPUT
/OUTPUT,ELIST,lis
ELIST
/OUTPUT
!显示计算结果
/EFACET,1
PLNSOL, VOLT
!退出当前处理器
FINISH
```

B.2 双层交叠GEM

```
!清理内存并开启一个新的程序
/CLEAR,START
!定义文件名称
/FILNAME,gem,1
!定义标题
/TITLE,Double-layer GEM (non-staggered mode)
!进入PREP-7前处理器
/PREP7
!激活p-method功能
/PMETH,OFF,1
!指定电磁场分析功能
KEYW,PR-ELMAG,1
```

```

KEYW,MAGELC,1
!定义一个三维10结点固体
ET,1,SOLID123
!定义各项材料的介电常数和电阻率，然后对其进行编号归类。
MP,PERX,1,1e10
MP,RSVX,1,0 !METAL
MP,PERX,2,3.5 !KAPTON
MP,PERX,3,1 !GAS
pitch=140
!建立下层GEM
WPOFFS,70,0,0
CONE,25,35,30,60,0,360
CONE,35,25,0,30,0,360
WPOFFS,-70,0,0
WPOFFS,0,70*sqrt(3),0
CONE,25,35,30,60,0,360
CONE,35,25,0,30,0,360
WPOFFS,0,-70*sqrt(3),0
WPOFFS,140,70*sqrt(3),0
CONE,25,35,30,60,0,360
CONE,35,25,0,30,0,360
WPOFFS,-140,-70*sqrt(3),0
WPOFFS,70,140*sqrt(3),0
CONE,25,35,30,60,0,360
CONE,35,25,0,30,0,360
WPOFFS,-70,-140*sqrt(3),0
VSBV,3,4,,DELETE,KEEP
VSBV,2,4,,DELETE,DELETE
VSBV,3,5,,DELETE,KEEP
VSBV,1,5,,DELETE,DELETE
VSBV,12,6,,DELETE,KEEP
VSBV,2,6,,DELETE,DELETE
VSBV,3,7,,DELETE,KEEP

```

VSBV,4,7,,DELETE,DELETE
 VSBV,1,8,,DELETE,KEEP
 VSBV,3,8,,DELETE,DELETE
 VSBV,2,9,,DELETE,KEEP
 VSBV,1,9,,DELETE,DELETE
 VSBV,4,10,,DELETE,KEEP
 VSBV,2,10,,DELETE,DELETE
 VSBV,3,11,,DELETE,KEEP
 VSBV,4,11,,DELETE,DELETE
 !建立上层GEM
 WPOFFS,0,0,2000
 BLOCK,0,pitch,0,pitch*sqrt(3),0,50
 BLOCK,0,pitch,0,pitch*sqrt(3),50,55
 BLOCK,0,pitch,0,pitch*sqrt(3),0,-5
 CONE,25,35,25,50,0,360
 CONE,35,25,0,25,0,360
 CYLIND,35,,50,55,0,360
 CYLIND,35,,0,-5,0,360
 WPOFFS,pitch/2,pitch*sqrt(3)/2,0
 CONE,25,35,25,50,0,360
 CONE,35,25,0,25,0,360
 CYLIND,35,,50,55,0,360
 CYLIND,35,,0,-5,0,360
 WPOFFS,-(pitch/2),-(pitch/2)*sqrt(3),0
 WPOFFS,0,pitch*sqrt(3),0
 CONE,25,35,25,50,0,360
 CONE,35,25,0,25,0,360
 CYLIND,35,,50,55,0,360
 CYLIND,35,,0,-5,0,360
 WPOFFS,0,-pitch*sqrt(3),0
 WPOFFS,pitch,0,0
 CONE,25,35,25,50,0,360
 CONE,35,25,0,25,0,360

CYLIND,35,,50,55,0,360
CYLIND,35,,0,-5,0,360
WPOFFS,-pitch,0,0
WPOFFS,pitch,pitch*sqrt(3),0
CONE,25,35,25,50,0,360
CONE,35,25,0,25,0,360
CYLIND,35,,50,55,0,360
CYLIND,35,,0,-5,0,360
WPOFFS,-pitch,-pitch*sqrt(3),0
VSBV,3,7,,DELETE,DELETE
VSBV,27,8,,DELETE,DELETE
VSBV,3,11,,DELETE,DELETE
VSBV,7,12,,DELETE,DELETE
VSBV,3,15,,DELETE,DELETE
VSBV,7,16,,DELETE,DELETE
VSBV,3,19,,DELETE,DELETE
VSBV,7,20,,DELETE,DELETE
VSBV,3,23,,DELETE,DELETE
VSBV,7,24,,DELETE,DELETE
VSBV,5,9,,DELETE,DELETE
VSBV,7,13,,DELETE,DELETE
VSBV,5,17,,DELETE,DELETE
VSBV,7,21,,DELETE,DELETE
VSBV,5,25,,DELETE,DELETE
VSBV,6,10,,DELETE,DELETE
VSBV,5,14,,DELETE,DELETE
VSBV,6,18,,DELETE,DELETE
VSBV,5,22,,DELETE,DELETE
VSBV,6,26,,DELETE,DELETE
!建立阴极
WPOFFS,0,0,-2000
WPOFFS,0,0,7000
BLOCK,0,140,0,140,0,5

```
!建立阳极
WPOFFS,0,0,-7000
WPOFFS,0,0,-4000
BLOCK,0,140,0,140,0,-5
WPOFFS,0,0,4000
!建立填充气体
BLOCK,0,140,0,140,7005,-4005
VSBV,9,8,,,KEEP
VSBV,10,2,,,KEEP
VSBV,9,1,,,KEEP
VSBV,10,4,,,KEEP
VSBV,9,5,,,KEEP
VSBV,10,3,,,KEEP
VSBV,9,7,,,KEEP
VSBV,10,6,,,KEEP
!粘合所有模型
VGLUE,ALL
!定义材质
VSEL,S,VOLU,,8,10,2
VATT,1,,1
VSEL,S,VOLU,,11,12
VATT,1,,1
VSEL,S,VOLU,,6,13,7
VATT,1,,1
VSEL,S,VOLU,,1,3,2
VATT,2,,1
VSEL,S,VOLU,,14
VATT,3,,1
!显示所有体编号
VSEL,S,VOLU,,ALL
VLIST,ALL
!定义电位
VSEL,S,VOLU,,6
```

```
ASLV,S
DA,ALL,VOLT,-1550
VSEL,S,VOLU,,13
ASLV,S
DA,ALL,VOLT,-1500
VSEL,S,VOLU,,12
ASLV,S
DA,ALL,VOLT,-1250
VSEL,S,VOLU,,11
ASLV,S
DA,ALL,VOLT,-850
VSEL,S,VOLU,,10
ASLV,S
DA,ALL,VOLT,-600
VSEL,S,VOLU,,8
ASLV,S
DA,ALL,VOLT,0
!网格化模型
MSHKEY,0
SMRT,1
VSEL,S,VOLU,,1,3,2
ASLV,S
VMESH,ALL
VSEL,S,VOLU,,14
ASLV,S
VMESH,ALL
!计算求解
/SOLU
SOLVE
!导出求解文件
/POST1
/OUTPUT,field,lis
PRNSOL
```

```
/OUTPUT  
/OUTPUT,NLIST,lis  
NLIST,,,,COORD  
/OUTPUT  
/OUTPUT,MPLIST,lis  
MPLIST  
/OUTPUT  
/OUTPUT,ELIST,lis  
ELIST  
/OUTPUT  
!显示计算结果  
/EFACET,1  
PLNSOL, VOLT  
!退出当前处理器  
FINISH
```