

分类号: O572
密 级: 公开

单位代码: 10422
学 号: 201311368



山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

博士学位论文

Dissertation for Doctoral Degree

论文题目: STAR 实验时间投影室内扇区升级中读出丝室的研制及性能测试

MWPC prototyping, construction and performance tests for
STAR inner TPC upgrade

作者姓名 沈付旺
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
合作导师 _____

2018 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：_____ 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：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

目 录

插图目录	5
表格目录	11
摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 引言	1
1.1 STAR iTPC 升级的物理背景	1
1.2 RHIC-相对论重离子对撞机	3
1.3 STAR 探测器	3
1.4 STAR TPC-时间投影室	5
1.4.1 TPC 结构及相关实验参数	5
1.4.2 TPC 工作原理	8
1.5 STAR iTPC 升级	10
1.5.1 升级原因	10
1.5.2 升级内容	11
1.5.3 升级后 TPC 的性能改进	13
1.6 论文安排	14
第二章 iTPC 多丝室制作	17
2.1 iTPC 三维结构及基本制作流程	17
2.1.1 iTPC 几何结构及相关制作精度要求	17
2.1.2 iTPC 多丝室基本制作流程	18
2.2 绕丝系统	19
2.2.1 绕丝系统构成	19
2.2.2 绕丝系统控制	19
2.2.3 张力传感器标定	22
2.2.4 张力监控	23
2.2.5 丝框绕制	24
2.3 丝张力及丝间距测量系统	25
2.3.1 丝张力测量原理	25
2.3.2 测量系统构成	26
2.3.3 基于 FFT 算法的振动频率抽取	27

2.3.4	张力测量系统检验	28
2.3.5	张力测量的误差分析	29
2.3.6	基于光栅尺及光强信号的位置信息获取	33
2.3.7	丝张力及丝间距测量	33
2.4	落丝系统及功能	34
2.5	iTPC 制作流程及质量控制体系	36
2.6	小结	39
第三章	基于 Garfield++ 的 iTPC 多丝室性能模拟	41
3.1	Garfield++ 模拟简介	41
3.2	模拟设置	41
3.2.1	气体选择	41
3.2.2	气体环境参数设置	43
3.3	P10 气体基本性能模拟	44
3.3.1	电子-离子在P10中的漂移	45
3.3.2	电子-离子在P10中的扩散	47
3.3.3	电子吸附系数	49
3.3.4	汤森系数	51
3.4	放射源及丝室空间布局	53
3.5	^{55}Fe X 射线在 P10 中的传输及能损模拟	53
3.5.1	^{55}Fe X 射线与Ar原子壳层的相互作用	53
3.5.2	^{55}Fe X 射线在 P10 气体中的衰减	54
3.6	δ 电子在P10中的传输及能损模拟	56
3.7	5.9keV X 光吸收空间分布	58
3.8	丝室电场模拟	59
3.9	电子运动径迹视觉化	60
3.10	电子雪崩及气体增益模拟	61
3.11	小结	62
第四章	iTPC 多丝室测试系统搭建	65
4.1	测试方案设计	65
4.2	组件设计制作及准备	67
4.2.1	iTPC 多丝室测试箱	67
4.2.2	放射源装置	68
4.2.3	放射源三维移动平台	69

4.2.4	混气仪及气体状态监控装置	69
4.2.5	丝端信号放大及读出设备	69
4.2.6	高压电源	72
4.2.7	系统集成	72
4.3	自动化测试系统设计和研发	74
4.3.1	自动化测试方案设计	74
4.3.2	160路通道选择器设计和制作	74
4.3.3	二维步进系统控制	83
4.3.4	位置感应与平台归零	87
4.3.5	温度压力传感数据获取	88
4.3.6	MCA 控制和通信	89
4.3.7	控制及数据获取软件开发	90
4.3.8	系统运行	91
4.4	小结	93
第五章	iTPC 多丝室性能测试	95
5.1	丝端信号特征及读出	95
5.1.1	丝端信号特征	95
5.1.2	丝端电路及信号读出	97
5.2	前置放大器及 MCA 标定	99
5.3	iTPC 电压扫描	101
5.4	iTPC 多丝室增益随 X 射线频率的变化	103
5.5	iTPC 增益随气体温度压力的变化	105
5.6	iTPC 多丝室增益均匀性扫描	106
5.7	iTPC 强辐照测试	107
5.8	STAR Run18 运行测试	109
5.9	小结	110
第六章	总结与展望	111
6.1	总结	111
6.2	展望	112
	参考文献	115
	博士期间发表的论文	121
	博士期间参加的科研工作	121
	附录 A 硬件控制及通信核心代码	123

A.1	Arduino 控制移位寄存器及 16 路继电器	123
A.2	二维步进系统控制	124
A.3	激光开关状态获取	125
A.4	温度压强模块的数据获取	125
A.5	Qt 串口通信	126
A.6	MCA 调用	126
A.7	数据可视化	126
A.8	多线程实现	127
附录 B	iTPC 落丝简程	129

插图目录

1.1	QCD 相变研究原理图 [10]	2
1.2	RHIC及周围实验装置空间分布照片	3
1.3	STAR 三维结构示意图	4
1.4	STAR TPC三维结构示意图 [18]	5
1.5	a STAR iTPC 多丝室的几何结构 [27]	6
1.6	一个完整 sector 上的读出板 pad plane 平面示意图, 可以发现, 内层 sector 的读出板相较外层来说数量较少, 分布稀疏, 覆盖率仅为 20%左右 [18]	7
1.7	多丝室内电场线分布图, a 门极丝整体加-115V, 可见门极丝面电场线为开门状态; b 中门极丝间隔加-115±75V, 可见门极丝面电场线为关门状态	7
1.8	电子-离子对在阳极丝表面的雪崩示意图 [28]	8
1.9	STAR TPC 内高能粒子能损随其动量的变化曲线 [18]	9
1.10	STAR TPC 重建出的高能带电粒子在其端盖多丝室上的径迹投影	10
1.11	左为 Pad plane 尺寸及布局设计图; 右为加工制作的样品照片 [27]	11
1.12	Strong Back 三维结构示意图	12
1.13	iTPC 升级之后对粒子探测能力的提升 [27]	13
1.14	iTPC 升级之后对 dE/dx 分辨率和粒子鉴别能力的提升 [27]	14
2.1	iTPC sector 三维结构示意图	17
2.2	iTPC 多丝室制作基本流程示意图	19
2.3	绕丝系统照片	20
2.4	丝间距控制部分: 为桌面电机, 编码器及步进导轨电机照片	20
2.5	张力控制部分: 滑轮系统, 张力传感器、丝轴及丝轴电机照片	21
2.6	绕丝系统间距与张力控制逻辑与算法	22
2.7	张力传感器标定曲线	22
2.8	绕丝张力实时监控	23
2.9	a 实时张力数据统计分布; b 绕丝张力随绕丝角度的变化	23
2.10	绕丝系统控制界面及相关设置	24
2.11	丝张力测量原理图	25

2.12 丝张力测量系统实景照片	26
2.13 丝张力测试系统光学平台	26
2.14 a 丝振动波形; b 利用快速傅立叶算法所抽取到的丝振动频率	27
2.15 利用标准重量砝码来控制特定张力的丝。	28
2.16 不同直径不同张力丝振动的测量结果	28
2.17 不同直径不同张力丝的重复测量结果	29
2.18 a 铍铜丝线密度对丝张力测量误差贡献; b 铍铜丝线长度测量对丝 张力测量误差贡献; c FFT 算法所抽取的丝振动频率浮动引起的 张力波动	31
2.19 相同丝在不同的起振幅度下的振动衰减波形图	32
2.20 不同丝在相同的起振幅度下的振动衰减波形图	32
2.21 从相同张力, 不同丝的阻尼振动所得到的阻尼系数的变化曲线	32
2.22 丝间距扫描过程中光强信号的变化	33
2.23 a 利用丝张力测试系统测得的阳极丝框和落丝安装后阳极丝面张 力分布对比; b 阳极丝间距测量结果对比	34
2.24 a 利用丝张力测试系统测得的阴极丝框和落丝安装后阴极丝面张 力分布对比; b 阴极丝间距测量结果对比	34
2.25 落丝平台照片	35
2.26 a 丝框位移装置; b 丝梳系统	35
2.27 a 落丝完成后丝面相对丝梳系统的位置; b 利用显微镜对丝面位 置进行复检	36
2.28 iTPC 制作流程布局	37
2.29 iTPC 制作照片	38
3.1 电子漂移速度随漂移电场强度的变化	46
3.2 电子在P10中的扩散系数随电场强度的变化	48
3.3 电子在 P10 中 135V/cm, 0T 的条件下漂移 1cm 的扩散分布	48
3.4 a 电子在P10中的吸附系数随电场强度的变化; b 电子空气中的吸 附系数随漂移电场的变化	50
3.5 电子团漂移 1cm 和 210cm 后剩余电子数量百分比随混入空气比 例的变化	50
3.6 剩余电子数量百分比随电子漂移距离与空气比例的变化关系	51
3.7 P10汤森系数随电场的变化	52
3.8 放射源及丝室空间布局	53

3.9	5.9keV X 射线与原子壳层的反应模式	54
3.10	a X 射线吸收衰减模拟设置示意图; b 为 5.9keV 和荧光 X 射线随 气体厚度的衰减	55
3.11	射线电离出的电子数分布	57
3.12	a 和 b 为光子吸收的空间分布,其中点的坐标为吸收点的空间位 置,单位为 cm; c 和 d 为 X 射线电离产生的两个 δ 电子的传输路 径和传输长度分布	58
3.13	上图为 iTPC 多丝室测试箱内 X 光电离位置侧视图; 下图为 iTPC 多丝室测试箱内 X 光电离位置的空间俯视图	59
3.14	丝室电场空间分布	59
3.15	X 射线电离出的电子在丝室电场下的漂移径迹视觉化	60
3.16	a 为丝室电子漂移电离雪崩图; b 为 1120V 阳极电压下, 5000 电 子在 P10 气体中雪崩产生的电子数分布	61
3.17	c 为增益模拟电压扫描。	62
4.1	多丝室自动化测试系统控制逻辑框架	66
4.2	测试箱爆炸示意图	67
4.3	测试箱各部件尺寸	68
4.4	a 为 ^{55}Fe 防护外壳 3 维及尺寸示意图; b 为 X 射线管的防护罩外壳 及聚焦端盖 3 维及尺寸	68
4.5	X-Y 二维步进导轨 3 维示意图及尺寸	69
4.6	a 瑞士 Huba699 系列压差计; b BMP180 压力温度测试模块	70
4.7	a 为 Amptek A225 实物图; b 为 Amptek MCA8000D 实物图	71
4.8	测试系统集成示意图 [32]	73
4.9	测试系统照片	73
4.10	通道选择器逻辑结构及工作原理示意图	74
4.11	固体继电器工作原理图	75
4.12	16 路固体继电器模块实物照片	76
4.13	74HC595 芯片	77
4.14	74HC595 芯片引脚分布及功能图表	77
4.15	Arduino 级联 2 个 8 位移位寄存器各引脚走线示意图	78
4.16	Arduino 级联 2 个 8 位移位寄存器的实物连接图	79
4.17	160 路通道选择器的整体安装框架设计图	80
4.18	160 路通道选择器的整体安装框架示意图 1	80

4.19	160 路通道选择器继电器与移位寄存器微观视角	81
4.20	160 路通道选择器的整体安装框架示意图2	81
4.21	160 路通道选择器的侧视	82
4.22	160 路通道选择器制作	82
4.23	57系列两相步进电机电气图示	83
4.24	DM542 步进电机驱动器实物图和步进电机控制逻辑	84
4.25	步进电机驱动器与微控制器连接方法	84
4.26	步进电机驱动器各控制信号时序图	84
4.27	Arduino 控制两个步进电机的组件连线示意图	86
4.28	单片机、开关电源、驱动器引脚以及步进电机连接图	86
4.29	集成并制作完成的二维进系统控制箱照片	87
4.30	激光对射光电开关照片	88
4.31	激光对射开关与单片机的连接图示	88
4.32	a Arduino-BMP180走线示意图; b Arduino-BMP180连接示意图	89
4.33	iTPC 多丝室自动测试系统软件截图	92
5.1	a 多丝正比室信号产生机制; b 微分信号及信号积分示意图	96
5.2	多丝室结构及信号相关特征	96
5.3	iTPC 多丝室单根阳极供电及读出电路等效示意图	97
5.4	左为iTPC 多丝室单根阳极丝在电压 1320V 下的脉冲信号; 右为经过电荷灵敏放大器放大成形后的阳极丝信号脉冲	98
5.5	电荷灵敏前置放大器工作原理图。	98
5.6	a 为信号发生器产生的方波信号, 信号产生频率设定为1kHz; b 为方波信号经电荷灵敏放大器放大成形后的波形显示	100
5.7	a 为输入电量为 0.04pC 下对应的 MCA 通道分布; b 为标定之后得到的输入电量与 MCA 通道的线性关系	100
5.8	a 不同电压的阳极增益扫描; b 为全能峰和逃逸峰在不同电压下对应的 MCA 通道之比	101
5.9	a 模型对两峰之比随电压变化的预测; b 左图, 竖线区间内图形放大, 即对应实验电压区间内两峰峰值之比的变化	102
5.10	a 固定放射源位置, 得到的放射源中心向外共40根丝的事例率变化; b 相应丝的增益分布	104
5.11	多丝室增益随着 X 射线事例率变化	104

5.12	ab 测试箱内实时压力和温度变化; c 增益随气体压力、温度变化曲线	105
5.13	iTPC 多丝室自动测试扫描路径方案	106
5.14	a 不同位置不同阳极丝的增益; b 471个测试点的增益分布; c 为不同位置不同阳极丝的能量分辨; d 为 471 个测试点的能量分辨率的分布 [32]	107
5.15	a iTPC 多丝室单丝测得的 X 射线管能谱; b 为 X 射线管与 ^{55}Fe 在不同丝上的事例率之比	108
5.16	a CAEN 高压模块电流监控和获取软件GECO2020软件截图; b 整个探测器, 4 个高压通道电流在一个小时内的变化	108
5.17	TPC 端盖径迹投影	109
5.18	升级后的iTPC安装到 TPC 上之后, 相关的性能变化	110

表格目录

1.1	STAR TPC 结构和实验设置等参数	6
2.1	iTPC 多丝室各层丝参数, 及相应的制作精度(\pm)	18
3.1	Mgaboltz 可模拟气体及其模型精度	43
3.2	气体探测器中常用的几种气体的性质。I 为最小电离粒子在标准 状态 (20°C , 760 Torr ($1 \text{ Torr} = 1.33 \times 10^2 \text{ Pa}$)) 下的平均激发能量, dE/dx 单位为 $\text{MeV}/\text{gcm}^{-2}$, i.p. = ion pairs [43, 44, 45, 46]	44
3.3	氩离子在氩气中的迁移率随约化电场的变化	47
4.1	测试所需元素、性能要求及相应解决方案	66
4.2	BMP180模块参数及相关性能	70
4.3	Amptek A225放大成形部分的相关参数	71

Contents

Chinese Abstract	I
ABSTRACT	III
1 Introduction	1
1.1 The physics motivation of STAR iTPC upgrade	1
1.2 RHIC-Relative Heavy Ion Collider	3
1.3 STAR detector	3
1.4 STAR TPC	5
1.4.1 TPC geometry and basic parameters	5
1.4.2 TPC operating principle	8
1.5 STAR iTPC upgrade	10
1.5.1 Motivation	10
1.5.2 Upgrade contents	11
1.5.3 Significance	13
1.6 Thesis arrangement	14
2 iTPC MWPC construction	17
2.1 iTPC geometry and basic construction flow	17
2.1.1 iTPC geometry and the precision requirements of construction	17
2.1.2 iTPC MWPC construction flow	18
2.2 Wire winding system	19
2.2.1 The components of the system	19
2.2.2 Wire tension and pitch control system	19
2.2.3 The calibration of the tension sensor	22
2.2.4 Wire tension monitoring	23
2.2.5 Wire winding	24
2.3 Wire tension and pitch measurement system	25
2.3.1 Wire tension measurement principle	25
2.3.2 The components of the measurement system	26
2.3.3 Frequency extraction based on the FFT algorithm	27
2.3.4 The test of the wire tension measurement system	28

2.3.5	The error analysis for the wire tension measurement	29
2.3.6	Wire position extraction from intensity distribution of the emitted light	33
2.3.7	Wire tension and pitch measurement	33
2.4	Wire mounting system and corresponding function	34
2.5	The iTPC construction flow and corresponding quality control . .	36
2.6	Summary	39
3	iTPC simulation with Garfield++	41
3.1	Introduction to Garfield++ and iTPC simualtion	41
3.2	Simulation setup	41
3.2.1	Gases	41
3.2.2	Gas parameters setup	43
3.3	P10 Transport parameters simulation	44
3.3.1	The drift of electrons and ions in P10	45
3.3.2	The diffusion of the electrons and ions	47
3.3.3	The electrons attachment coefficient	49
3.3.4	Townsend coefficient	51
3.4	The layout of the radiation source and testing chamber	53
3.5	^{55}Fe X-ray transport and energy loss in P10	53
3.5.1	The interaction between ^{55}Fe X-ray and the Argon shell . .	53
3.5.2	^{55}Fe X-ray attenuation in P10	54
3.6	δ electrons transport and energy loss simulation	56
3.7	The 5.9 keV X-ray absorbtion position distribution in the MWPC test chamber	58
3.8	The MWPC electric field simulation	59
3.9	The visualization of the electrons drift	60
3.10	The avalanche and gas gain simulation	61
3.11	Summary	62
4	iTPC MWPC test system setup	65
4.1	Test system setup	65
4.2	Components design and construction	67
4.2.1	iTPC MWPC test chamber	67
4.2.2	The protection and focusing device for the radioactive source	68

4.2.3	X-Y-Z mobile platform	69
4.2.4	Gas mixture and monitoring	69
4.2.5	The amplification and DAQ for wire readout signal	69
4.2.6	HV power	72
4.2.7	System integration	72
4.3	Auto test system design and implementation	74
4.3.1	Auto test scheme design	74
4.3.2	The design and construction of 160 channels selector	74
4.3.3	The X-Y stepper system control	83
4.3.4	The position sensor & laser receiver	87
4.3.5	The DAQ of the gas temperature and pressure sensor	88
4.3.6	MCA control and communication	89
4.3.7	Control and DAQ software design and implementation	90
4.3.8	System operation	91
4.4	Summary	93
5	iTPC MWPC performance test	95
5.1	The anode wire readout	95
5.1.1	The characteristics of the anode wire readout signal	95
5.1.2	The anode wire readout circuit	97
5.2	The calibration of the charge sensitive amplifier and MCA	99
5.3	iTPC anode voltage scan	101
5.4	iTPC MWPC gas gain versus X-ray count rate	103
5.5	iTPC MWPC gas gain versus gas temperature and pressure	105
5.6	iTPC MWPC gas gain uniformity	106
5.7	Strong radiation test	107
5.8	Beam test	109
5.9	Summary	110
6	Conslusions and Outlook	111
6.1	Conslusions	111
6.2	Outlook	112
	References	115
	Papers Published During Masters	121
	Projects Participated During Masters	121

A	Hardware control and communication code	123
A.1	The register and 16 relay module control by Arduino	123
A.2	2D stepping system control	124
A.3	The laser switch status monitoring	125
A.4	The DAQ of the gas temperature and pressure sensor	125
A.5	Qt serial communication	126
A.6	MCA implicit call	126
A.7	Data visualization	126
A.8	Multi-threading implementation	127
B	The sample of iTPC wire mounting flow	129

摘 要

相对论重离子对撞实验 RHIC-STAR 的第二期能量扫描(Beam Energy Scan II, BES-II)计划正在进行, STAR 谱仪的部分探测器需要进行必要的升级, 其中 STAR 时间投影室内层丝室(inner Time Projection Chamber, iTPC) 的升级是此次探测器的升级的重点。iTPC 升级主要是重新设计和制作读出板 Padplane, 更换丝室所有的丝面, 升级前端电子学。升级可以将 STAR TPC 膺快度接收度从 $|\eta| < 1.0$ 扩展到 $|\eta| < 1.5$, 提高对低横动量粒子的探测能力, 同时因为径迹接收度和完整性的增加, 可提高对粒子动量和电离能损 dE/dx 的分辨率。山东大学负责此次 iTPC 升级中的关键部分即丝室的研制和测试。本论文的工作涵盖了从原型研制、性能模拟优化、批量制作、测试系统搭建以及探测器性能测试的整个过程。

iTPC 制作主要分为以下几个步骤: 读出板的粘接, 丝挂载的安装和定位, 丝框绕制, 丝面组装, 涂胶焊接, 丝张力和丝间距的测量以及电学检测等。由于丝室性能对丝室几何结构比较敏感, 多丝室制作最关键的是要精确控制丝面的机械精度。其次, 丝室本身集成了多项完全不同的工程部件, 整个丝室制作需要考虑较多的完全不同的工程物理问题。既要做到精度高又要能够高效地完成多丝室的制作是该项工程的关键。对于丝面的机械精度来说, 主要是控制其张力和丝间距。实验室独有绕丝系统和 PID 控制算法可绕制特定张力和间距的丝框。基于激光反射平台、精密步进系统以及快速傅立叶分析算法 FFT 的丝张力及丝间距测量系统, 可以极高的精度对丝框及组装好的丝室进行张力间距检测, 是丝室制作过程中不可或缺的质量控制设备。本人除了参与此测量系统的研制之外, 对该系统做了标定, 对测量误差的来源和贡献做了详细分析。除此之外, 本人还参与了丝室的制作, 主要是利用高平整度的大理石平台、丝框位移系统和丝梳系统进行丝面的组装。对于丝室的批量制作来说, 为了高效质优地完成工程任务, 在样机制作经验基础之上, 总结开发了一套完整的制作流程和质量控制方案。

iTPC 是个典型的气体探测器, 丝室工作的性能不仅与本身的机械结构有关, 还与其工作的环境密切相关。为了研究丝室工作中所涉及到的物理和对相关性能的影响, 利用 Garfield++ 对 iTPC 多丝室做了一个系统的模拟和计算。其中包括, 模拟和计算了多丝室工作气体 P10(90%Ar+10%CH₄) 的基本性质, 如电子-离子在该气体中的漂移和扩散, P10 的吸附系数和汤森系数; 因实验所用的放射源为 ⁵⁵Fe, 故模拟了 ⁵⁵Fe X 射线和 δ 电子在 P10 中的运输、电离、能损和衰减; 由于放射源本身是一个直径 0.5mm 的面源, 不经过聚焦, 模拟了放射源在丝室内电离点的空间分布, 并视觉化了电离电子在丝室内的漂移和在丝端的分布情况; 对于 iTPC 来说, 我们着重其不同电压下的增益及其正比

性，模拟了电子在丝端的雪崩以及丝室在不同电压下的增益等。模拟结果不仅与 TPC 内的相关实验数据相吻合，而且与后期丝室性能测试的结果有个很好的符合。

iTPC 主要用于 STAR TPC 带电粒子径迹的重建和粒子鉴别，该丝室的测试着重的是其增益及其在整个丝面上的均匀性。测试系统利用的是已知能量的 ^{55}Fe 射线源作为丝室的信号源。针对放射源的防护和聚焦，设计并制作了铜基防护和聚焦装置。因 ^{55}Fe X 射线的能量较低，测试箱的 X 射线窗采用 $100\mu\text{m}$ 的柔性 PCB。考虑到整个丝面的跨度比较大，设计并搭建了射线源的二维移动平台。因为丝室性能与气体状态密切相关，所以开发了气体状态监控的数据获取模块。利用电荷灵敏放大器和成形以及 MCA 进行丝端信号的放大和数据获取。同时为了批量测试的考量，设计和制作了一个批量自动化测试的系统，包括二维步进系统的控制，160 路通道选择器的设计和制作，MCA 控制与通信，最后是控制软件的编写，比如串口通信、多线程、数据可视化的实现等等。

利用搭建的测试系统和相关的模拟经验，对 iTPC 多丝室进行了一个系统的性能测试。包括多丝室丝端信号的读出，数据获取电子学如电荷灵敏放大器，成形和 MCA 的标定。研究了多丝室增益随着电压的变化，测试结果显示增益变化的正比性与理论有个很好的符合。同时在测试中发现了空间电荷效应所造成的相对增益降低，建立了一个数理模型，能够很好的解释相关的变化曲线。还测量了增益随着 X 射线事例率的变化。研究了气体增益随着气体温度和压强的变化。利用 ^{55}Fe 对丝室进行了增益和能量分辨均匀性的扫描，测试结果显示丝室的增益均匀性好于 $1\%(\text{RMS}/\text{Mean})$ ，能量分辨好于 $20\%(\text{FWHM})$ 。利用高强度的 X 射线管对丝室进行了强辐照测。其中一个制作完成的 iTPC 探测器成功安装到了 STAR TPC，参与了 STAR Run18 的运行，完成了 Cluster Finder 等相关的径迹搜索算法，利用实验数据分析了 iTPC 对 TPC 性能的影响，比如 TPC 对低横动量粒子探测的阈值减至 $60\text{Mev}/c$ ，赝快度的覆盖区间从 $\eta < -1.5$ 扩展到了 $\eta < -1.9$ 。总结以上，所有的探测器性能及对 TPC 性能的扩展都达到了升级设计的要求。

最后总结了本文中所涉及到的工作，对未来 TPC 和丝室的进一步性能优化和升级做了一定的设想和展望。

关键词: iTPC 升级；多丝室制作；Garfield++模拟；X 射线测试系统搭建；性能测试

ABSTRACT

The Beam Energy Scan Phase II(BES-II) program of the Relativistic Heavy Ion Collision (RHIC) is underway, and some detectors of the STAR spectrometer need to be upgraded. The upgrade of the STAR inner Time Projection Chamber(iTPC) is significant for the BES-II. The iTPC upgrade will re-instrument the inner pad planes, renew the inner sector wire chambers and corresponding front end electronics. The upgrade will expand the TPC acceptance from pseudo-rapidity $|\eta| < 1.0$ to $|\eta| < 1.5|$, and enable better acceptance for tracks with low momentum, as well as better resolution in both momentum and energy loss dE/dx for tracks of all momenta. The enhanced capabilities achieved from the iTPC upgrade are crucial to the physics program of the BES-II. Shandong University is responsible for the iTPC MWPC construction and performance test. This thesis covers the whole process from prototype development, performance simulation, batch production, test system setup and detector performance test.

The iTPC construction is mainly divided into the following steps: pad plane bonding, wire mounts installation and pinning, wire frame winding, wire plane mounting, epoxy, wire soldering and wire tension and pitch measurement and so on. Since the performance of the MWPC is sensitive to their geometry, it is necessary to control the mechanical precision of the wire grids for the iTPC MWPC construction. Secondly, the iTPC sector integrates different engineering components, we should consider a lot of different engineering and physical problems. For the mechanical precision, it should mainly control the wire tension and wire pitch. The unique wire-wound system of Shandong University HEPG lab and its PID control algorithm can be used to wind wire frames with specific tension and pitch. They can be measured with high precision by the wire tension and pitch measurement system based on the laser reflection platform, precision stepping system and fast Fourier analysis algorithm(FFT). In addition to participating in the development of this measurement system, I also did a calibration and a detailed analysis of the source and contribution of the measurement error for this system. I also participated in the wire mounting using high-flatness marble platform, wire frame displacement system and wire combs. For the mass production of the iTPC, a construction flow and quality control program are designed and implemented based on the construction experience.

iTPC is a typical gas detector. Its performance is not only related to its own

mechanical structure, but also closely related to its working environment. In order to study the physics and the impact on MWPC performance, a relatively comprehensive simulation was carried out using Garfield++. It includes (1) the basic properties simulation of the working gas P10(90%Ar+10%CH₄), such as the electron-ion drift and diffusion, the attachment and Townsend coefficient of P10. (2) Due to the ⁵⁵Fe is used in the performance test. So the simulation for the transport, ionization, energy loss and attenuation of ⁵⁵Fe X ray and δ electrons in P10 is performed. (3) And the ⁵⁵Fe used in the performance test is a surface source which has a 5 mm diameter. The X-rays emitted was not collimated, so the distribution of ionization position in the test chamber is simulated. (4)For the iTPC MWPC performance the gas gain is crucial to the track reconstruction and dE/dx calculation. The electrons avalanche on the iTPC MWPC anode wire and the gas gain under different anode voltages were simulated. The simulation results are not only consistent with the experimental data in TPC, but also have a good agreement with the results of the later performance test.

iTPC is mainly used for the charged particle track reconstruction and particle identification. The test of the iTPC MWPC focuses on the gas gain and its uniformity. The ⁵⁵Fe was used as the radiation source which could emit definite energy X-ray(5.9 keV). Copper-based shield was designed and fabricated for the protection. Because the energy of ⁵⁵Fe X ray is relatively low, the X ray window of the test chamber is a 100 μ m flexible PCB. Considering the geometric span of the iTPC MWPC is large, a two-dimensional mobile platform is designed and built. Since the performance of MWPC is closely related to the gas temperature and pressure, a data acquisition module for gas status monitoring has been developed. The charge sensitive amplifier, shaper are used to amplify the signal from anode wire. The multichannel analyzer(MCA) are used to acquire the pulse data. Meanwhile, in order to consider the batch test, a automatic batch test system was designed and constructed. Including the control of two-dimensional stepping system; the design and production of 160 channels selector; MCA control and communication; the development of control software, such as serial communication, multi-threading, data visualization and so on.

A complete iTPC performance test was carried out using the built X-ray test system and simulation experience. Including the readout of anode wire signals, the calibration of data acquisition electronics such as charge sensitive amplifiers, shaper and MCA. The gas gain under different anode voltage was tested. The

results show the proportionality of the gain is in good agreement with the theory. In addition, the relative gain reduction caused by the self induced space charge effect was found in the test, and a mathematical model was established, which can explain the relevant curve well. The variation of the gain with the count rate of X-ray was also measured. The gain versus the temperature and pressure of the gas also studied. Using ^{55}Fe we scanned the uniformity of the gas gain and energy resolution, the test results show that the gain uniformity is better than 1%(RMS/Mean), the energy resolution is better than 20%(FWHM). A strong irradiation test on the MWPC was also done with the copper target X-ray tube. One iTPC sector that was produced and tested was installed on the TPC and the some tests was performed. And the test results show the low transverse momentum threshold reduced to 60Mev/c, the η coverage extended by 0.4 units. Above all, these results are in good agreement with the performance requirements.

In the end, the works involved in this paper were summarized and the further performance optimization and upgrade of TPC and the MWPC in the future are conceived and prospected.

Key words: iTPC upgrade; MWPC construction; Garfield++ simulation; X-ray test system; Performance test

第一章 引言

1.1 STAR iTPC 升级的物理背景

标准模型是描述强力、弱力、电磁力及组成所有物质的基本粒子的理论。其中量子电动力学(Quantum Electrodynamics, QED) 用来描述电磁相互作用 [1], 弱电相互作用理论用来描述弱相互作用, 这两种理论被实验精确而完整地证实了。量子色动力学(Quantum Chromodynamics, QCD)用来描述强相互作用 [2], 因其部分理论的证实需要极高的能量和相对苛刻的实验条件, 目前并没有被实验精确完整地证实。强相互作用具有渐进自由和“色禁闭”的特征, 上世纪七十年代, 国际物理学界提出通过相对论重离子碰撞, 利用热力学的集体效应改变 QCD 的真空结构, 使得夸克和胶子在一个较大的范围内运动, 可以形成一种新的物质状态-夸克胶子等离子体(Quark-Gluon Plasma, QGP)。随后人们便开始研究 QGP 的性质以及实验室的产生, 并扩展到高温高密条件下 QCD 相变, 讨论强相互作用的相结构。对 QGP 性质及 QCD 相变结构的研究不仅有助于我们对微观量子效应的深入理解, 检验标准模型的可靠性, 更能帮助我们理解宇宙初期演化和大质量星体内部的物理过程。目前对新的物质形态 QGP 的性质、实验室产生以及 QCD 相变结构的研究已经成为高能核物理实验的核心课题。

美国相对论重离子对撞机(Relative Heavy Ion Collider-RHIC) 是第一个设计用来进行相对论重离对撞实验的大型对撞机。自 2001 年运行以来的实验结果显示, QGP 很可能在重离子碰撞的早期阶段就已经形成了 [3, 4, 5, 6]。QCD 相图的两个关键参量是体系的温度和重子化学势, 格点 QCD 计算确定从夸克相到强子相存在跨越 [7], 一些基于 QCD 的理论模型预言在高化学势区域存在一阶相变的临界点(Critical Point) [8]。因为体系的温度和重子化学势随着碰撞能量的变化而变化 [9], RHIC 重离子碰撞试验的质心能量可以从 200GeV 低至 7.7GeV, 相应覆盖的温度和重子化学势范围更广, 非常适合研究 QCD 相变结构和寻找 QCD 相变边界。为了研究(1) 不同碰撞能量下 QGP 信号产生和消失; (2) 寻找 QCD 一级相变的证据; (3) 寻找 QCD 相变临界点, RHIC 自 2010 年开始进行能量扫描计划(Beam Energy Scan-BES), 对撞能量包括从 7.7Gev 到 200GeV 的 6 个能量点。在 2010-2011 年进行了一期的能量扫描, 在 5 个质心能量: 39, 27, 19.6, 11.5, 7.7GeV 下获得了金核-金核(Au+Au) 的碰撞试验数据。数据的分析结果显示在以上三个方面都有一些迹象, 但要给出明确的结论还需要对不同能量下的对撞进行一个更加详细、具体、精确的研究和测量, 所

以 RHIC 计划在 2019~2020 进行二期的能量扫描(BES-II) [10, 11]。在进行二期的能量扫描之前，需要对部分探测器进行升级，以期获得更加优良的探测能力。

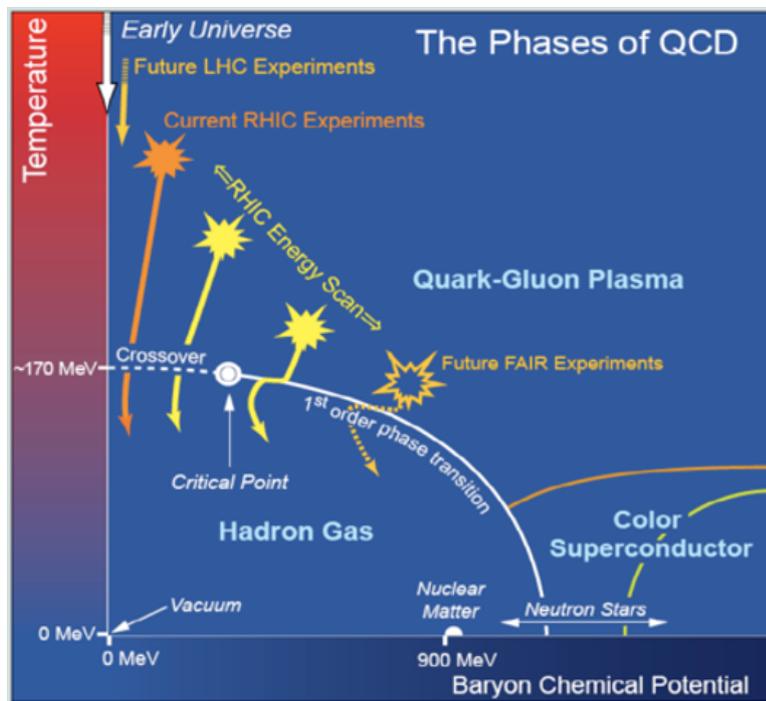


图 1.1: QCD 相变研究原理图 [10]

STAR 谱仪位于 RHIC 6 点钟方向，是六个对撞点之一。其时间投影室(TPC)的升级是二期能量扫描计划中探测器升级的一个重要项目。TPC 是 STAR 谱仪的径迹探测器，是整个探测器的核心部分，是一个典型的圆柱状结构，端盖部分由内外两层的多丝正比室和对应的读出系统组成。因其内层扇区(inner TPC-iTPC)的读出覆盖率只有其面积的 20%，接收度范围仅限于中心赝快度区 $\eta < 1$ ，且丝室也出现老化现象，因此 STAR 计划对内层扇区进行重新设计和制作。主要是重新设计读出板 pad plane 和更换丝室的三层丝面，使得读出覆盖率从 20% 提高到 100%，丝室的性能如增益均匀性更加优良。以此可使得粒子测量的覆盖范围从 $\eta < 1$ 扩展到 $\eta < 1.7$ ，同时对低横动量($p_T < 1\text{GeV}$)粒子的探测效率将从目前的 3% 大幅提高到 20% 左右，同时因为径迹长度和完整度的增加，其电离能损 dE/dx 的测量精度也会由 7.53% 提高到 5.75%，从而大幅度提高 STAR 探测器的探测效率、径迹重建能力和粒子鉴别能力。接收度和动量测量范围的提高和扩展将会提高测量的统计性、径迹重建和粒子鉴别能力的提高将会降低系统的测量误差，进而对实现 BES-II 能量扫描目标中的重要参数测量如重子直接流、守恒荷高阶矩等起到关键作用，为 QCD 相变结构和相变临界点给出确定的答案。

1.2 RHIC-相对论重离子对撞机

RHIC 是唯一的重离子对撞专用对撞机，也是史上唯一的极化质子对撞机。它位于美国纽约长岛的布鲁克海文，于 1991 年开始建造,历经十年的时间于 2000 年开始正式运行 [13]。图 1.2是 RHIC 及周围实验装置的空间布局图，它由两个同心圆加速器组成，周长 2.4 英里，利用超导磁铁环进行束流的聚焦和引导对撞。利用这个装置，其可将对撞的重离子质心系能量加速到 $\sqrt{NN} = 200\text{GeV}$ ，将计划的质子束流的质心对撞能量加速到 $\sqrt{NN} = 500\text{GeV}$ 。RHIC 加速重离子的工作流程为:(1) 重离子通过两个串列式

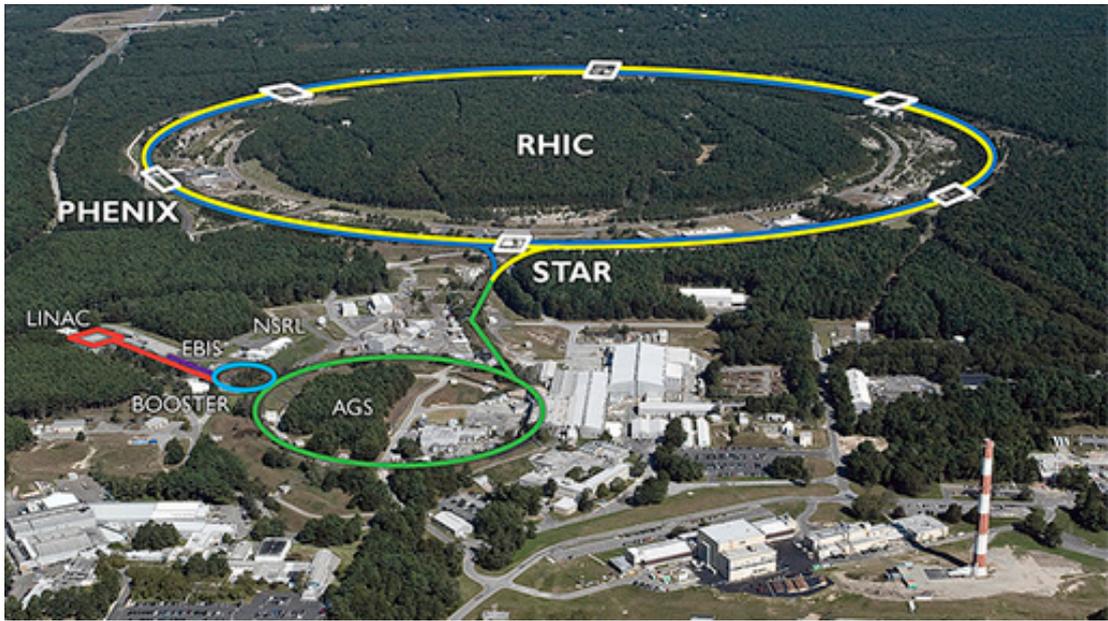


图 1.2: RHIC及周围实验装置空间分布照片

范德格拉夫静电加速器后被加速，同时电子被剥离，电荷达到+32e；(2) 随后离子被注入到增强器(Booster Synchrotron)，进一步加速及电子剥离；(3) 然后注入到同步加速器(Alternating Gradient Synchrotron, AGS)，被进一步加速和剥离电子，达到 10.8Gev/u 和 +79e。(4) 然后离子被注入到 RHIC 环内，被加速到最高能量并保存数小时来进行相应的对撞实验。目前 RHIC 进行的对撞实验有 Au+Au、Cu+Cu、p+p 以及 d+Au。RHIC 上一共有六个对撞点，STAR 作为其中主要的探测器之一，位于 RHIC 的六点钟方向。

1.3 STAR 探测器

STAR 探测器是 RHIC 上的主要探测器之一，其内部结构紧凑，可追踪对撞过程中产生的数千粒子 [14, 15, 16]。主要用来研究高温高密条件下的物质性

质，寻找 QGP 产生的相关信号，研究 QCD 相变结构。图显示的是 STAR 探测器的三维结构图，在探测器的桶状部分，由内到外依次有：(1) 重味粒子探测

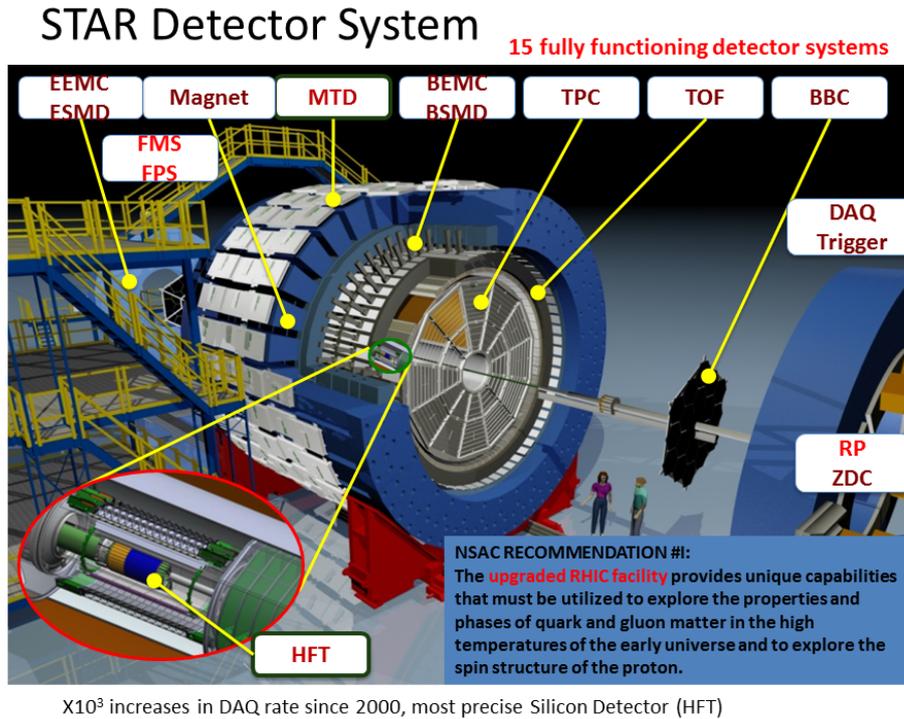


图 1.3: STAR 三维结构示意图

器(Heavy Flavor Tracker, HFT) [17]，主要用来进行对撞点附近的径迹跟踪；(2) 时间投影室(Time Projection Chamber, TPC) [18]，主要用来进行带电粒子径迹重建和粒子鉴别；(3) 中央环形触发探测器(Central Scintillator Barrel, CTB) [19]，是一比较快速的探测器，主要用来为触发系统提供触发信号；(4) 飞行时间探测器(Time Of Flight detector, TOF) [20]，也称为时间飞行谱仪，有着较高的探测效率和极快的时间分辨，对中动量的粒子有较好的鉴别能力；(5) 桶形电磁量能器(Barrel Electro-Magnetic Calorimeter, BEMC) [21]，用来鉴别高横动量的光子和带电轻子如 π, K, e, p ；(6) 磁铁 [22]，STAR 探测器的磁铁可以在束流方向上或者是纵向上提供一个 0.25-0.5T 的匀强磁场，因为大部分的探测器都在磁铁以内，通过带电粒子在磁场中的旋转，可以测量带电粒子的动量；(7) μ 子探测器(Muon Telescope Detector) [23]，主要用来探测 μ 轻子，提高 μ 子的鉴别能力。当然在探测器的端盖部分还有有：(1) 前向时间投影室(Forward TPC, FTPC) [24]；(2) 端部电磁量能器(Endcap Electro-Magnetic Calorimeter, EEMC) [25]；(3) 束流探测器(Beam Beam Counters, BBC) [26]等。在众多的 STAR 探测器中，时间投影室 TPC 一直以来是作为其功能的核心存在的。

1.4 STAR TPC-时间投影室

1.4.1 TPC 结构及相关实验参数

STAR 时间投影室可以重建带电粒子的径迹，测量带电粒子动量、能损以及鉴别带电粒子的种类 [18]。它是一个典型的桶状结构，如图 1.4 是 STAR TPC 的三维结构示意图。其长度为 2 米，内外直径分别 0.5m 和 2.0m。中间为一负高压膜，将整个 TPC 分成两个等长度的漂移区，创造了一个沿束流方向的电场强度为 135V/cm 的匀强电场。磁铁会在 TPC 内形成一个沿束流方向的匀强磁场，且磁场强度和方向可调。其端盖部分为内外两层的多丝正比室和读出系统(分别称为 inner sector 和 outer sector)，每个端盖内外两层各有 12 个，每层共有 24 个。整个 TPC 可以覆盖整个方位角($\phi = 2\pi$)，赙快度覆盖范围为

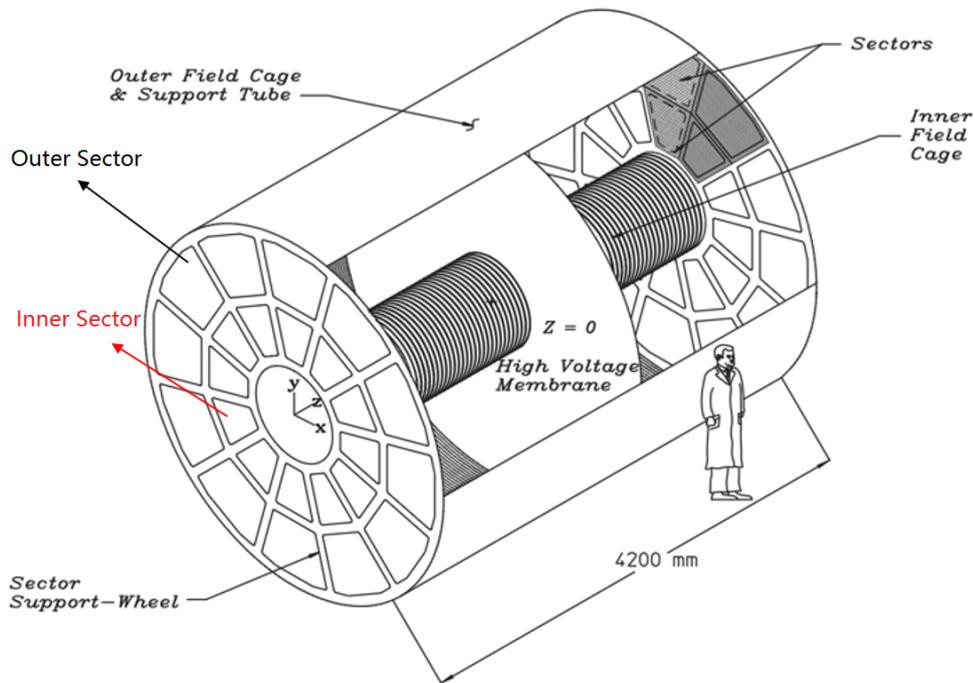


图 1.4: STAR TPC 三维结构示意图 [18]

$\eta < 1.8$ 。其内部充以 P10(90%+10%CH₄) 作为其工作气体。其相关参数可总结为表格 1.1。

参数	值	描述
TPC 长度	420cm	2 个漂移区，每个 210cm 长
外漂移直径	400cm	半径200cm
内漂移直径	100cm	半径50cm
负高压膜到接地平面距离	209.3cm	左右两边距离相同

负高压膜直径	400cm	位于 TPC 的中央
负高压膜电压	28KV	实验设置
漂移气体	P10	90%Ar + 10%CH ₄
气体压强	大气压强+2mbar	规定设置
电子漂移速度	5.45cm/ μ s	典型值
纵向扩散(σ)	200 μ m/ \sqrt{cm}	140V/cm & 0.5T
横向扩散(σ)	360 μ m/ \sqrt{cm}	140V/cm
多丝室数量	24	每边各 12 个
读出 pad 数量	136608	
信噪比	20:1	
电子学成形时间	180ns	半高宽
信号动态范围	10bits	
采样率	9.4MHz	
采样深度	512 time buckets	
磁场强度	0, \pm 0.25T, \pm 0.5T	螺线管型

表 1.1: STAR TPC 结构和实验设置等参数

多丝正比室及其读出系统是 TPC 的核心部件，用来放大电离信号和定位电离位置，结合时间和磁场信息便能够得到能损、动量测量和粒子鉴别的能力。它是一典型的多丝室结构，图 1.5 显示的是内外两层多丝室的三维结构示意图及相应的几何分布信息。由下往上依次是多丝室支撑铝框 Stong back，阴极读出板 Pad Plane，阳极丝 Anode Wire，阴极丝 Shield Wire 和门极丝 Gated Wire。其中内层丝室也称为 "Inner TPC Sector" 即 iTPC，其阳极丝到阴极丝和阴极读出板的距离相等为 2mm，阴极丝到门极丝的距离为 6mm，阳极丝间距为 4mm，阴极丝以及门极丝间距为 1mm。其中图 1.6 显示的是一个完整 sector 上的读出板 pad plane 的平面示意图，内层 sector 上的 pad 覆盖率只有稀疏的几列，总数为 1750 个，整体覆盖率只有 20%。

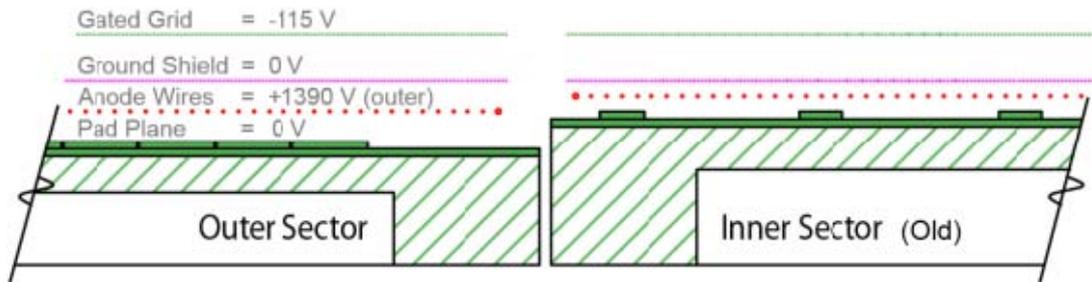


图 1.5: a STAR iTPC 多丝室的几何结构 [27]

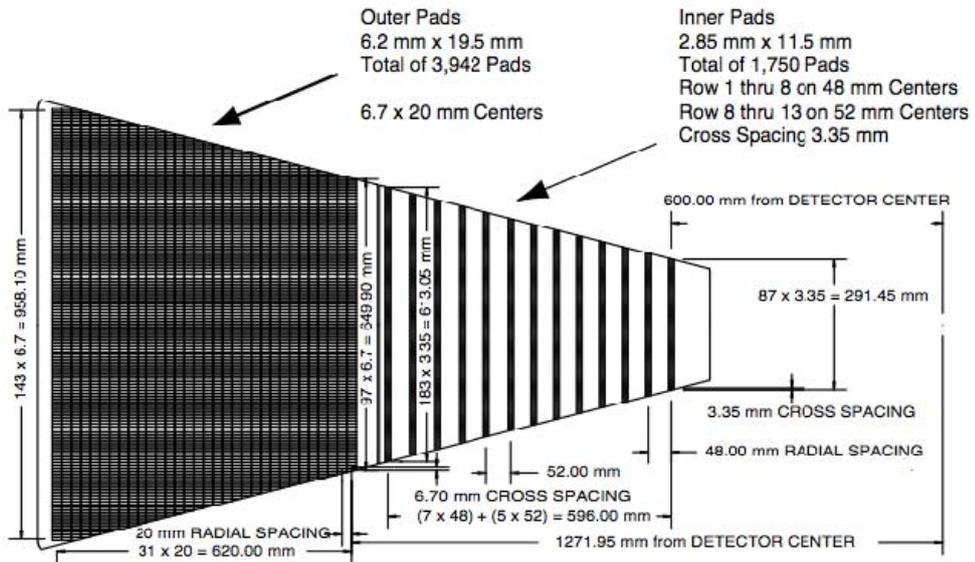


图 1.6: 一个完整 sector 上的读出板 pad plane 平面示意图, 可以发现, 内层 sector 的读出板相较外层来说数量较少, 分布稀疏, 覆盖率仅为 20%左右 [18]

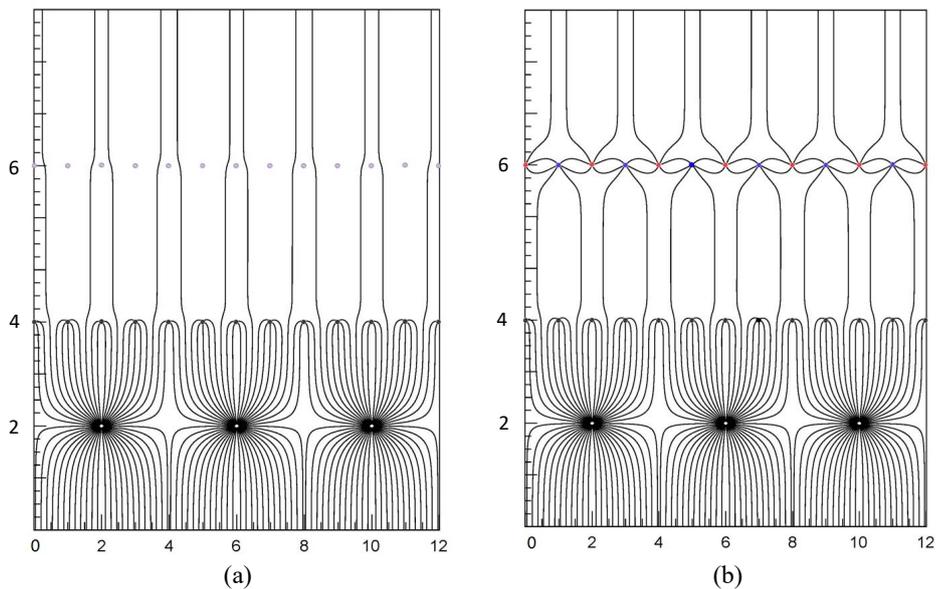


图 1.7: 多丝室内电场线分布图, a 门极丝整体加-115V, 可见门极丝面电场线为开门状态; b 中门极丝间隔加-115±75V, 可见门极丝面电场线为关门状态

1.4.2 TPC 工作原理

当对撞产生的带电粒子射入到 TPC 内部时会因与气体分子的碰撞而损失能量，产生的效果是工作气体被电离，从而在其飞行或者是旋转路径上留下电离径迹。电离径迹上的电子离子对会沿着电场线运动，因为中间是负高压膜，所以电子会飘向端盖部分的多丝正比室。在 135V/cm 的匀强电场下，其漂移速度为 5.45cm/ μ s。

虽然 RHIC 每秒对撞的频率很高，但 TPC 工作时其记录数据的频率远低于此，一方面受原初电离的电子从对撞点漂移到多丝室的时间和前端电子学宽带限制；一方面针对不同的物理信号，我们只触发或者是记录感兴趣的事例；还有一点就是多丝室上有一层门极丝，通过电压设置进行开关门，用来阻挡回流的阳离子漂移到主漂移区以免影响空间电场的均匀性。而开关门涉及到门极丝电压的升降，需要花费较多的时间。具体的，工作时阳极丝面加正高压 1120V，阴极丝接地，读出板接前端电子学。门极电场打开时，门极丝面统一加 -115V，门极电场关闭时，则门极丝间交错相加 -115 \pm 75V 的电压。由静电学计算可得到截面上的电势为 [28]：

$$V(x, y) = \frac{CV_0}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{2\pi l}{s} - \ln \left[4 \left(\sin^2 \frac{\pi x}{s} + \sinh^2 \frac{\pi y}{s} \right) \right] \right\} \quad (1.1)$$

电场强度为：

$$E(x, y) = \frac{CV_0}{4\epsilon_0 s} \left[1 + \tan^2 \frac{\pi x}{s} \tanh^2 \frac{\pi y}{s} \right]^{1/2} \left[\tan^2 \frac{\pi x}{s} + \tanh^2 \frac{\pi y}{s} \right]^{-1/2} \quad (1.2)$$

如图 1.7，丝室产生了一个由阳极丝向阴极丝面和读出板辐射的电场，左右两幅图分别显示了门极丝开关门状态的电场线分布示意图，可明显看到不同状态下的电场线分布差别。当门极丝状态为开时，高能带电粒子会沿着产生的电场

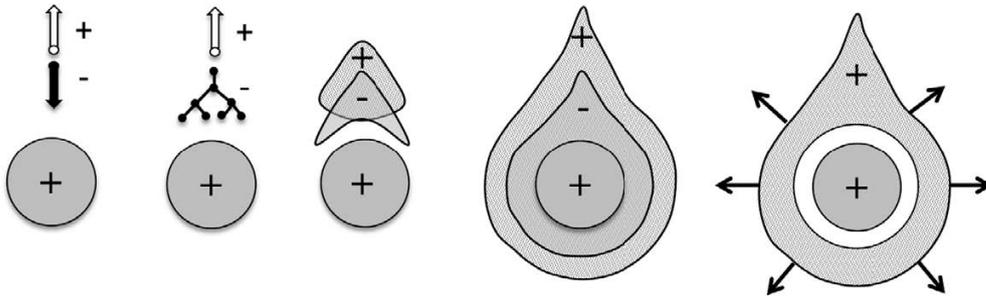


图 1.8: 电子-离子对在阳极丝表面的雪崩示意图 [28]

线运动。因为越靠近丝面其电场强度越大，当电场强度达到一定值时，电子会在其一个平均电离自由程内获得足够的能量，在下一碰撞时，再一次产生次级的电子-离子对。随着电场的不断加强，电子-离子对产生的越来越快，越来越

多，从而产生电子雪崩，如图 1.8。雪崩产生的电子-离子对将整个阳极丝包裹起来，因为电子的运动速度受电场强度的影响比较大，所以其很快就被吸收了，雪崩产生的阳离子则会相对缓慢地沿着多丝室内的电场线移动直至被吸收。由电磁感应原理我们知道，移动的电荷会在产生电场线的附近丝上产生负信号，而在读出板 pad plane 上产生正信号。由电荷中心或者是高斯拟合的方法可以将电荷雪崩的重心计算出来，从而得到原初电子在 φ 平面上的坐标。根据系统触发时间、前端电子学信号到达时间以及电子的漂移速度就可以确定高能带电粒子的三维径迹。根据磁场和径迹半径信息可得到带电粒子的动量。对于相同的工作电压来说，单个原初电子雪崩产生的次级电子-离子对数是相对固定的，根据得到的信号电量的大小可以确定原初电子的个数或者高能粒子的能损，由径迹长度和所得到的能损总和就能得到带电粒子在气体中单位距离上的能损 dE/dx 。

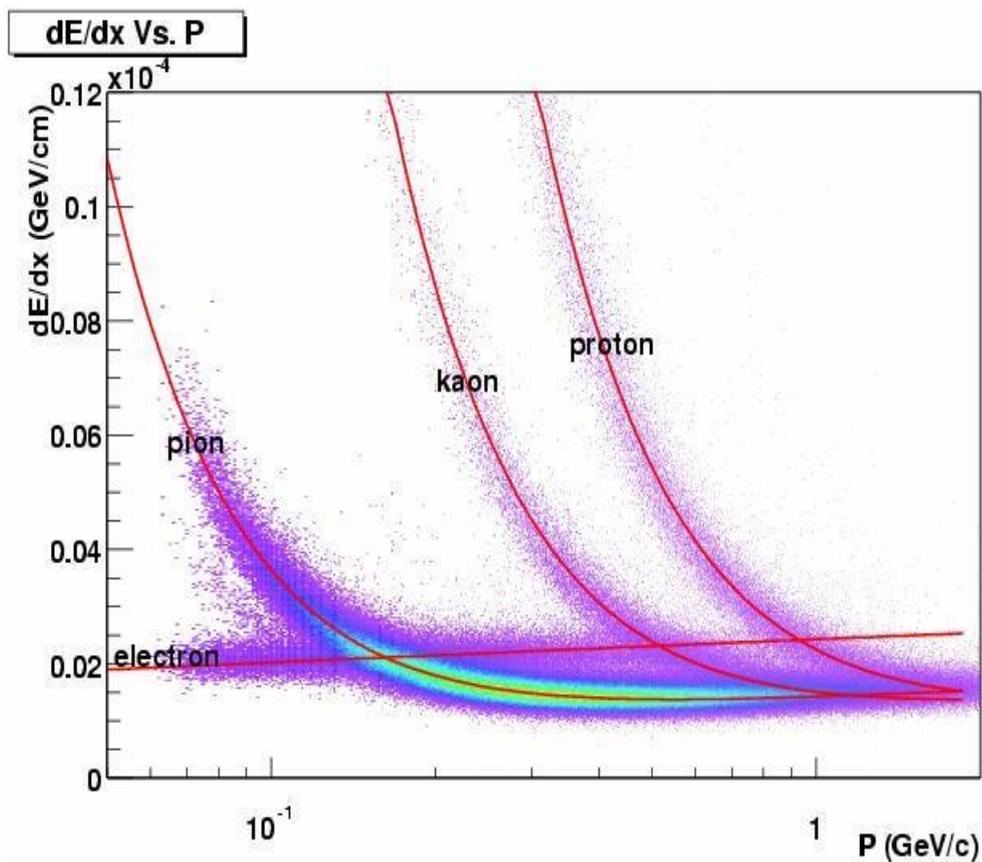


图 1.9: STAR TPC 内高能粒子能损随其动量的变化曲线 [18]

对撞产生的高能带电粒子在 TPC 内的能损 dE/dx [29] 可由 Bethe-Bloch 公式 [30] 给出。

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 z^2 \left(\frac{Z}{A}\right) \left(\frac{1}{\beta^2}\right) \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right) \right] \quad (1.3)$$

式中, N_a 为阿伏加德罗常数; Z 和 A 分别为介质原子的原子系数和质量系数; r_e 为经典的原子半径; z 为入射粒子的电荷数; m_e 电子静止质量; $\beta = v/c = pc/E$ (v 为如何粒子速度, c 为光速, p 为入射粒子动量, E 为入射粒子的总能量); $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$; δ 为密度效应参数; $x = X\rho$ 称为约化的介质层厚度, X 为介质层厚度, 单位为 cm; ρ 为介质密度。可以看到能损与粒子的质量无关, 与入射粒子的种类和动量有关。对于不同的带电粒子来说, 相同的动量却有着不同的 dE/dx , 这样就能达到鉴别粒子的目的。图 1.9 显示的是 STAR TPC 内测量的粒子的能损随着其动量的变化曲线, 可见不同的粒子其能损曲线可以很好地分开, 即其有较好的粒子鉴别能力。

1.5 STAR iTPC 升级

1.5.1 升级原因

前面提到了 iTPC 升级的物理背景, 接下来我们就从结构上看一下, iTPC 硬件升级的原因。我们从图 1.6 看一明显的看到, 对于内外两层的 Sector 来说, 内层 Sector 的 pad plane 的覆盖率较外层来说少了很多, 只有 20%, 这明显会对对于粒子径迹的重建以及对粒子鉴别的效率造成一定的影响。我们从图 1.10 上可以看到, 对于内层的 Sector 来说, 重建的径迹投影的密度和完整度都远逊于外层的 Sector, 直观地说明了 iTPC 对整个 TPC 性能的影响。首先

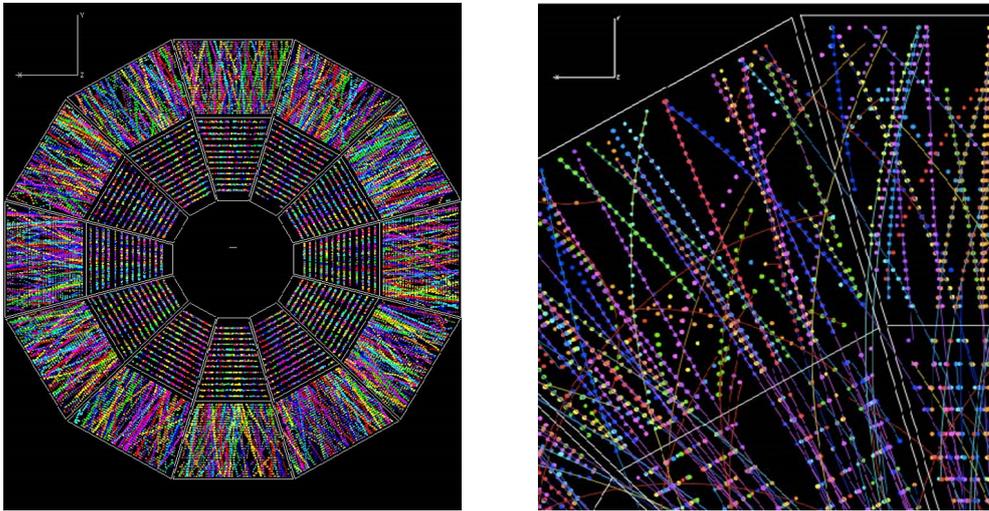


图 1.10: STAR TPC 重建出的高能带电粒子在其端盖多丝室上的径迹投影

iTPC 位于 TPC 端盖的内层, 属于大快度区域, 对低横动量的带电粒子来说, 只有 iTPC 能够看到他们在 TPC 内的电离径迹, 低横动量粒子的鉴别能力主要依靠 iTPC。其次, 由于 iTPC 的读出板 pad plane 覆盖率较低, 会导致径迹不完整, 从而对径迹重建的效率产生一定的影响, 再者, 对重建出来的径迹来

说，径迹不够连续，这样对整个带电粒子在 TPC 内的能损计算不够准确。而对二期的能量扫描来说，除了增加不同的对撞能量区间之外，对于探测器的性能，或者对事例重建的精度同样提了一定的升级要求。TPC 作为 STAR 探测器的核心部件，对其功能的升级是整个探测器一系列升级的重点，而对 iTPC 的升级正好能够大幅度提升 TPC 的性能。总结来说对于 iTPC 的升级，我们渴望能够达到的目的有：(1) 提高 TPC 在大速度区间的接受度；(2) 提高 TPC 的径迹重建效率和粒子鉴别能力；(3) 提高对低横动量的带电粒子的探测能力。

1.5.2 升级内容

1.5.2.1 硬件方面

从 iTPC 的结构特征来说，我们可以进行的升级有：(1) 因 iTPC pad plane 的 pad 覆盖率较低，要从原来的覆盖率的 20% 提高到 100%，pad 的数量从原来的 1750 增加到了 3440。在设计中就要考虑到在原有的框架尺寸下如何提高覆盖率的同时使得读出通道的数量加倍。图 1.11 显示的是 pad plane 的设计分布图和制作实物图，其中包括各 pad 的位置以及所划分的读出区块，所有的 pad 共分成 55 个读出区，并用不同的颜色所区分。具体的变化有：pad 的尺寸从原来的 $2.85\text{mm} \times 11.5\text{mm}$ 变为现在的 $4.5\text{mm} \times 15.5\text{mm}$ ；pad 的行数从原来的 13 行变为现在的 40 行。(2) 对 iTPC 的三层丝来说，要替换老化的丝面，全部

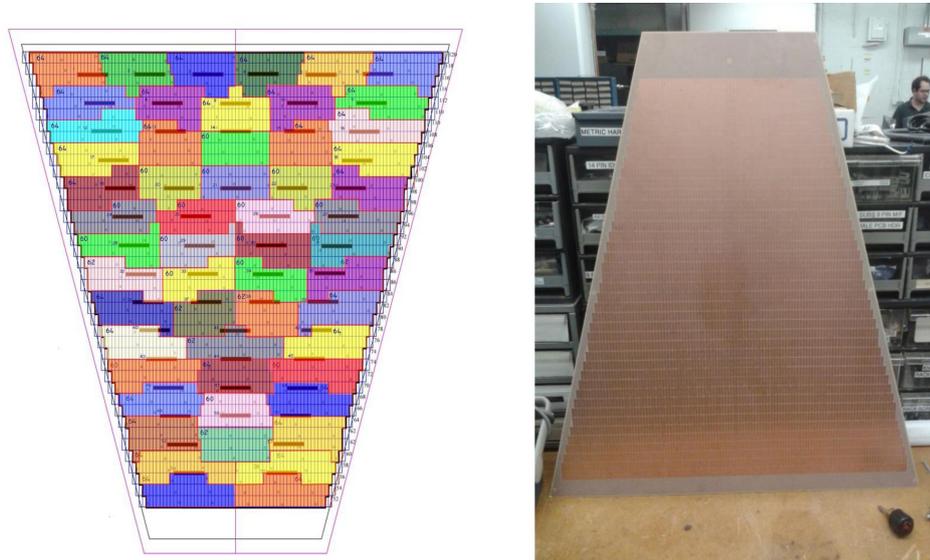


图 1.11: 左为 Pad plane 尺寸及布局设计图；右为加工制作的样品照片 [27]

换成新丝；(3) 因读出通道的增加，相应的前端电子学(Front End Electronics, FEE)也需要升级。升级后的前端电子学使用称为 SAMPA 的芯片，该芯片曾设计为 ALICE TPC 升级之用。新设计的电子学也成为(iFEE)可将原来每模块 32

个读出通道的数量增加到 64 个 [27]。(4) Strongback 是 iTPC 最大的一个部件，用于支撑整个多丝室，由航空铝合金加工而成。在 iTPC 的升级中同样需要重新加工新的 Strongback。由于 Strongback 直接决定了 iTPC 在 TPC 上的安装精度，丝面的几何布局等等，所以对其加工精度有极高的要求。图 1.12 显示的是 Strong Back 的三维结构照片，其中左图为 Strongback 正面，该面用于粘接 pad plane 等 PCB 板，和三层丝面一样面向 TPC 内测。右图为为 Strongback 背面，可以看到有很多预留孔位，用于安装前端电子学、冷却及密封装置等。因为 Strongback 加工的精度直接关系到读出板 pad plane 的平整度，进而能

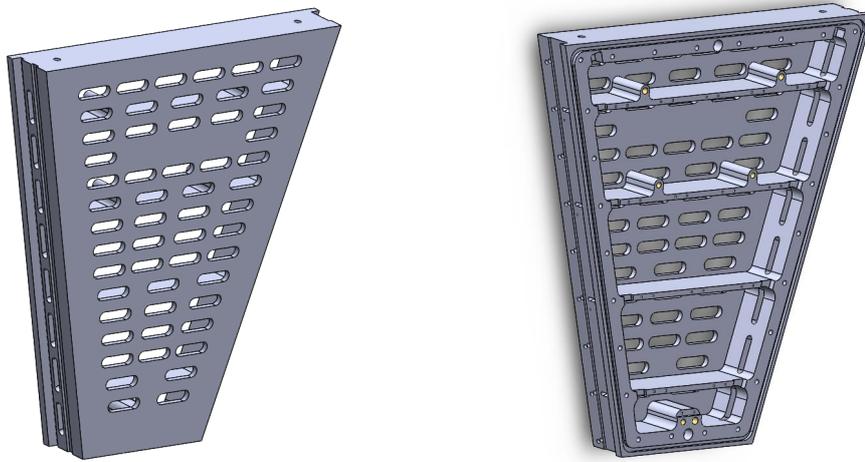


图 1.12: Strong Back 三维结构示意图

够影响增益的均匀性，比如 Strongback 粘接平面的平整度要好于 $\pm 12\mu\text{m}$ 才能保证增益的均匀性在 $\pm 1\%$ 的区间内变化，而加工精度的最终要求是平面的平整度要控制在 $\pm 5\mu\text{m}$ 。另外，和升级之前的 Strongback 相比，有两点最大的不同：(1) 新的前端电子学(iFEE)的安装结构和老的 FEE 有些不同，安装这些电子学需要 Strongback 有新的安装结构；(2) 针对阳离子泄漏问题，可通过在 Strongback 的两端安装金属边条的方式进行阻挡吸收，这样安装这些金属边条也需要一些额外的安装孔。

1.5.2.2 性能方面

相应的从多丝室性能上或者是操作参数来说，可得到的改变有：(1) 多丝室增益的均匀性要好于 $2\%(\text{RMS}/\text{Mean})$ ；(2) iTPC 的探测效率应好于 92% ；(3) 能量分辨率(Sigma/Mean)应好于 15% ；(4) 阳极工作电压从 1170V 降到 1120V 。

1.5.3 升级后 TPC 的性能改进

前面提到了，iTPC的升级可增加 TPC 在大快度区间的接受度，和对低横动量粒子的探测能力。图 1.13显示的 iTPC 升级前后对各粒子在不同动量、快度区间的探测能力的对比。(1) 从左边的一列的三幅图可以看到，对 π 、 K 、 p

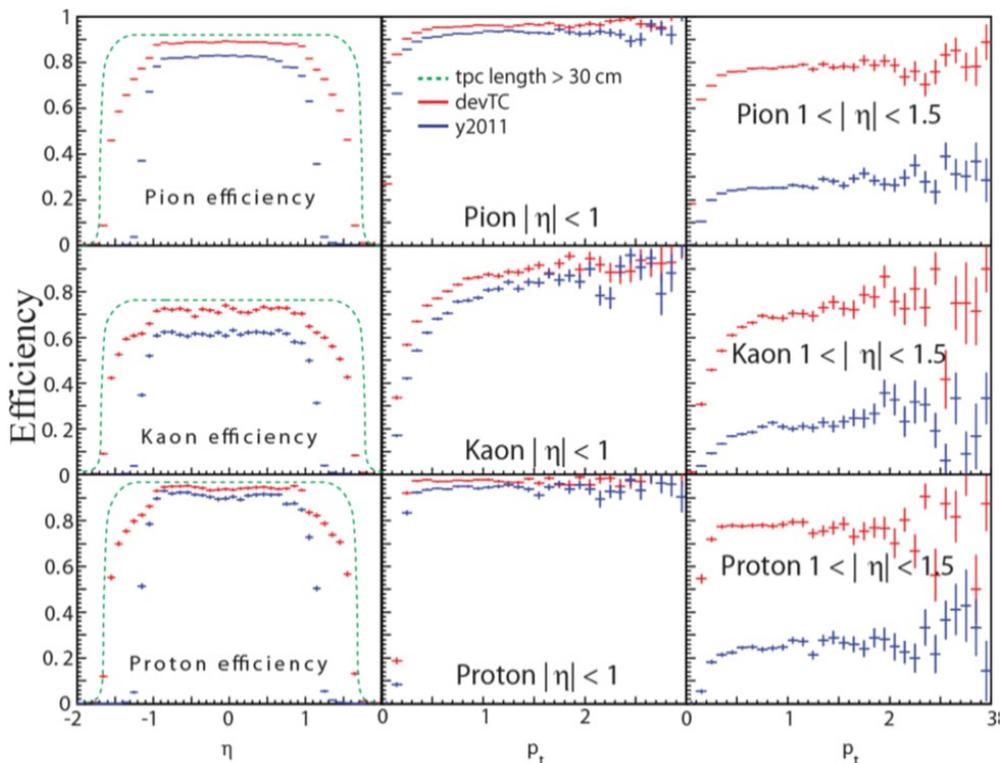


图 1.13: iTPC 升级之后对粒子探测能力的提升 [27]

三种粒子来说，iTPC 升级之后不仅提高了粒子的探测能力，还拓展了其在大快度区间的接受度；(2) 从中间一列图可看到相同的快度区间，iTPC 升级之后在对整个动量范围的粒子探测能力也都有所提高；(3) 从第三列可以看到，在大快度区间，iTPC 升级之后对这三种粒子的探测能力相对来说有了更大幅度的提高。

因为 pad plane 上 pad 覆盖率的提高，会使径迹重建效率和质量都得以提高，同样也会使粒子的能损数据更加完整，所得到的粒子在单位约化距离上的能损 dE/dx 也会更加准确。图 1.14显示的是在快度 $\eta < 1$ 和 $\eta > 1$ 两种快度区间下 iTPC 升级前后 dE/dx 的分辨率随径迹长度的变化。从这两副图中我们可以得到的信息有：(1) 在 $\eta < 1$ 的快度区间，对于所有长度的径迹来说，其 dE/dx 分辨提升 1% 左右；(2) 在 $\eta > 1$ 的快度区间，对不同径迹长度的 dE/dx 分辨提升百分之几到百分之几十。可见 iTPC 升级能够使大快度区间的粒子鉴别能力大幅提升。

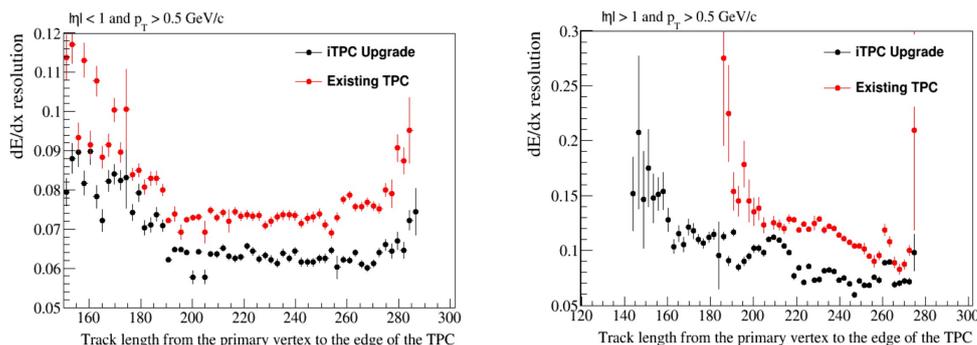


图 1.14: iTPC 升级之后对 dE/dx 分辨率和粒子鉴别能力的提升 [27]

1.6 论文安排

本文撰写的脉络是 STAR iTPC 的升级相关背景、内容和意义，iTPC 读出丝室的研制和流程优化，性能的模式，测试系统搭建和性能测试，因此论文分成了一下几个部分：

(1) 首先引言部分概述了 STAR iTPC 升级的物理背景，简要介绍了 RHIC 及 STAR 的组成结构和相应的功能，重点介绍了 STAR TPC 的组成结构和工作原理，详述了 STAR iTPC 升级的原因、内容和升级后给 TPC 性能带来的相应改进。

(2) iTPC 的制作主要分为两个部分，一个是 Pad plane 粘接和三层丝挂载的定位，另一个是 iTPC 丝室的组装。前一部分由美国劳伦斯伯克利国家实验室来完成，后一部分也是最关键的一部分，由国内的山东大学来研制完成。接下来会详细介绍 STAR iTPC 多丝室的研制过程，包括如何利用绕丝系统绕制特定张力和间距的丝框；如何利用丝张力和丝间距测量系统进行丝张力和丝间距的测量，如何利用相应的工具和数学分析对该系统进行标定和误差分析；如何利用专业的落丝系统进行丝面定位组装；如何利用研制的经验和专业的设备进行制作流程化和质量控制等。

(3) 在制作完成后，要面临的一个任务便是对丝室性能的测量，但是在测量之前，我们可以利用相关的模拟软件，对丝室的性能进行一个前期研究和调研，同时也可以作为后期测试的一个检查。所以第三部分主要介绍了如何利用探测器模拟软件 Garfield++ 来完成对丝室及其相关性能的模拟和计算。比如对多丝室工作气体 P10(90%Ar+10%CH₄) 基本性能的模拟，对放射源在丝室内电离点的空间分布模拟，对 X 射线和 δ 电子在气体中的传输、能损和衰减的模拟，对丝室在不同电压下的增益模拟等。

(4) 同时在 iTPC 测试前首先要进行测试系统的搭建，所以第四部分主要介绍了如何设计和搭建 iTPC 的测试系统，包括测试箱的设计和制作，放射源防

护和聚焦，气体状态的监控，丝端信号放大和读出系统的组装等。同时为了批量测试的考虑，搭建了一个自动化测试的系统，包括二维步进系统的搭建和控制，多通道选择器的设计和制作，气体温度压强数据的获取，MCA通信及数据获取，通信及控制软件的编写等等。

(5) 最后就是 iTPC 的测试，主要包括丝端信号的读出，数据获取电子学的标定，丝端增益随着电压的变化，增益随着放射源事例率的变化，增益随气体温度和压强的变化。利用 ^{55}Fe X 射线扫描了 iTPC 多丝室的增益和能量分辨的均匀性。同时利用高强度的 X 射线管对丝室进行了强辐照测试。其中一个制作完成的 iTPC 探测器被成功安装到 STAR TPC 上，并进行了相关测试。本文的最后给出了所做工作的一个总结和对未来多丝室进一步升级的一个设想和展望。

第二章 iTPC 多丝室制作

iTPC 多丝正比室的制作和生产是一件极具挑战性的工作,首先 TPC 的粒子鉴别功能,需要多丝室有良好的增益均匀性和能量分辨率。这些性能与多丝室的机械几何结构有着密切的联系,这就需要多丝室在制作的过程中拥有极高的精度。其次,对于一个成熟的探测器来说,多丝室本身集成了多项完全不同的工程部件,整个丝室的制作需要考虑较多完全不同的工程问题。怎样能够高效且精度较高地完成多丝室的制作生产任务是该项工程的关键,本章主要介绍了多丝室制作过程中的每个步骤,如何确保制作过程每一步的质量以及怎样统筹整个制作生产的流程。一般的,一个探测器制作主要分为 3 大部分:第一,机械部分,包括丝室框架,各层丝及其支撑机构的制作组装;第二,电子学部分,包括丝端及 pad plane 读出;第三,质量检查部分,包括丝室几何结构的检查,丝张力的检查,电子学检查,丝室性能测试等。每个部分在制作的过程中都会有所穿插交错,通过流程统筹优化达到高效质优地完成整个丝室的制作。

2.1 iTPC 三维结构及基本制作流程

2.1.1 iTPC 几何结构及相关制作精度要求

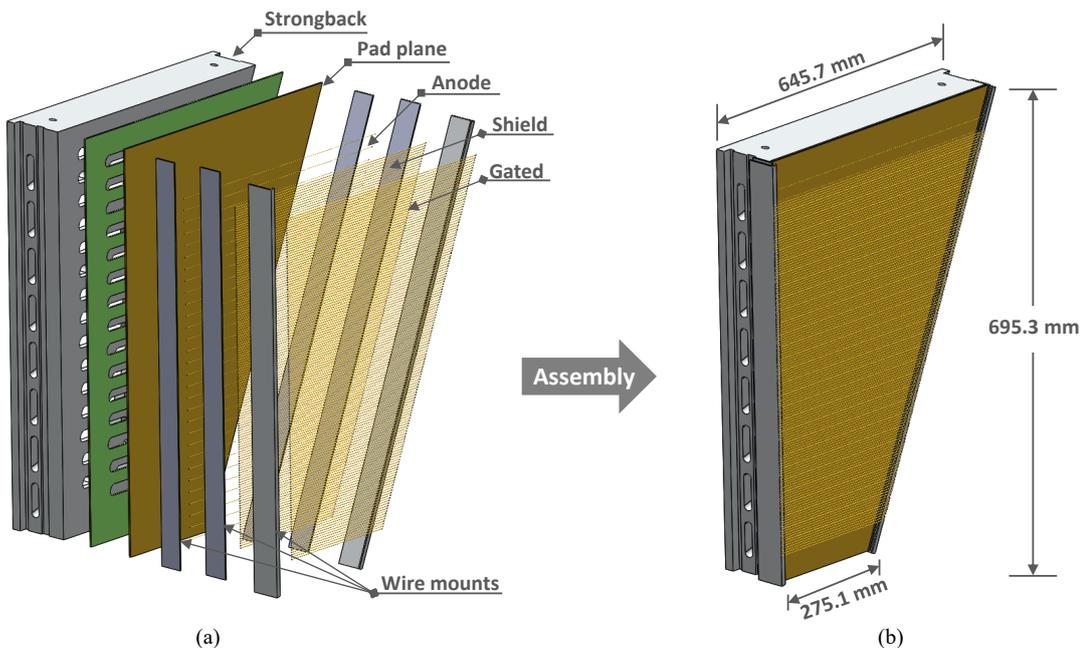


图 2.1: iTPC sector 三维结构示意图

图 2.1a 显示的是 iTPC sector 的三维爆炸示意图，其主要分为 Strongback-铝合金支撑框、Pad plane-pad 读出板、Anode-阳极丝、Shield-阴极丝、Gated-门极丝以及各层丝的挂载-Wire mounts [32]。图 2.1b 显示的是各部分组装之后的示意图及 iTPC sector 的整体尺寸。对于整个多丝室的机械制作来说，主要分工为两大部分：其一是 Strongback 和 Pad plane 的生产粘接；其二是整个多丝室 sector 的组装。第一部分由美国劳伦斯伯克利国家实验室来完成，第二部分由山东大学来完成。第二部分也可称为 iTPC 的多丝室制作部分。该部分主要是三层丝的组装，也是最关键的部分，不仅因为这一部分基本决定了整个 iTPC 的性能，也是因为这一部分是最具挑战性的部分，对制作的工具和制作精度要求都比较高。表 2.1 是各层丝面的几何布局及制作过程中所允许的误差。

Wire	Anode	Shield	Gated
Material	W	Be-Cu	Be-Cu
Diameter (μm)	20	75	75
Pitch (mm)	4 ± 0.01	1 ± 0.01	1 ± 0.01
Dist. to pad plane (mm)	2 ± 0.005	4 ± 0.005	10 ± 0.005
Tension (N)	0.5 ± 0.03	1.2 ± 0.06	1.2 ± 0.06

表 2.1: iTPC 多丝室各层丝参数，及相应的制作精度(\pm)

其中丝间距及丝到 Pad plane 的距离误差允许在 $10 \mu\text{m}$ 范围之内，阳极丝张力允许误差为 $\pm 3g$ ，阴极丝和门极丝张力允许误差为 $\pm 6g$ 。

2.1.2 iTPC 多丝室基本制作流程

图 2.2 显示的是 iTPC 多丝室的基本制作流程。对于多丝室的制作步骤来说，首先要考虑的是三层丝的绕制，其次检测每层绕制好的备用丝框张力；第三利用专业的落丝工具将绕制好的丝框再组装到 Strongback 和相应的挂载上；第五进行涂胶固定；第六进行焊接；第七进行相应的电学检测、张力和间距测量；如此循环3次，将三层丝面制作完成，最后进行 iTPC 性能的测试。其中每一步骤都会相应的制作和测量要求，具体可见每节介绍。

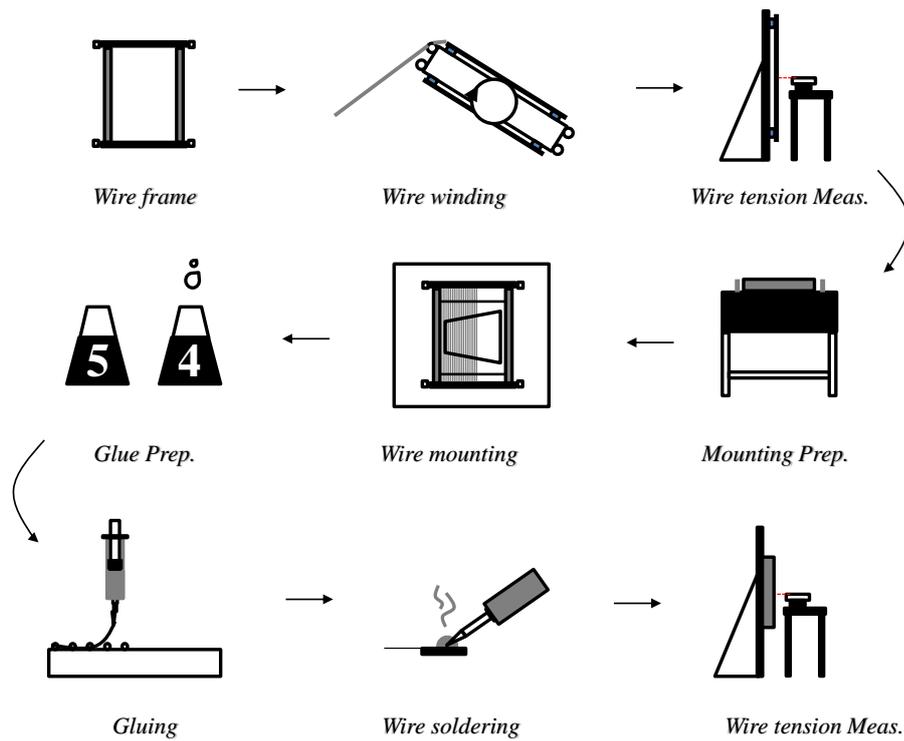


图 2.2: iTPC 多丝室制作基本流程示意图

2.2 绕丝系统

2.2.1 绕丝系统构成

丝框绕制需要考虑的因素主要有：(1)丝框的安装固定；(2)丝间距的控制；(3)丝张力的控制。其中要涉及到丝框的旋转，旋转角度的反馈，丝轴的步进，丝张力的反馈等等。图 2.3 显示的绕丝平台照片，该系统可绕制相应张力和间距的丝框，其由三大部分构成：(1) 机械部分；(2) 传感器部分；(3) 控制机箱。其中机械部分由旋转桌面或者丝框固定桌面、桌面电机、丝杠及丝杠电机构成；传感器部分由张力、步进电机编码器构成；控制机箱由开关电源、运动控制器等构成。

2.2.2 绕丝系统控制

2.2.2.1 丝间距控制

丝框绕制的丝间距控制主要通过桌面步进电机、步进电机编码器以及丝杠(导轨)步进电机来控制。图 2.5是丝间距控制的组件照片。其中丝框固定在绕丝桌面上，桌面步进电机控制桌面以一定的速度的旋转，桌面编码器可以实时监控桌面的角度。然后角度信息会反馈给计算机，计算机给导轨步进电机步进



图 2.3: 绕丝系统照片

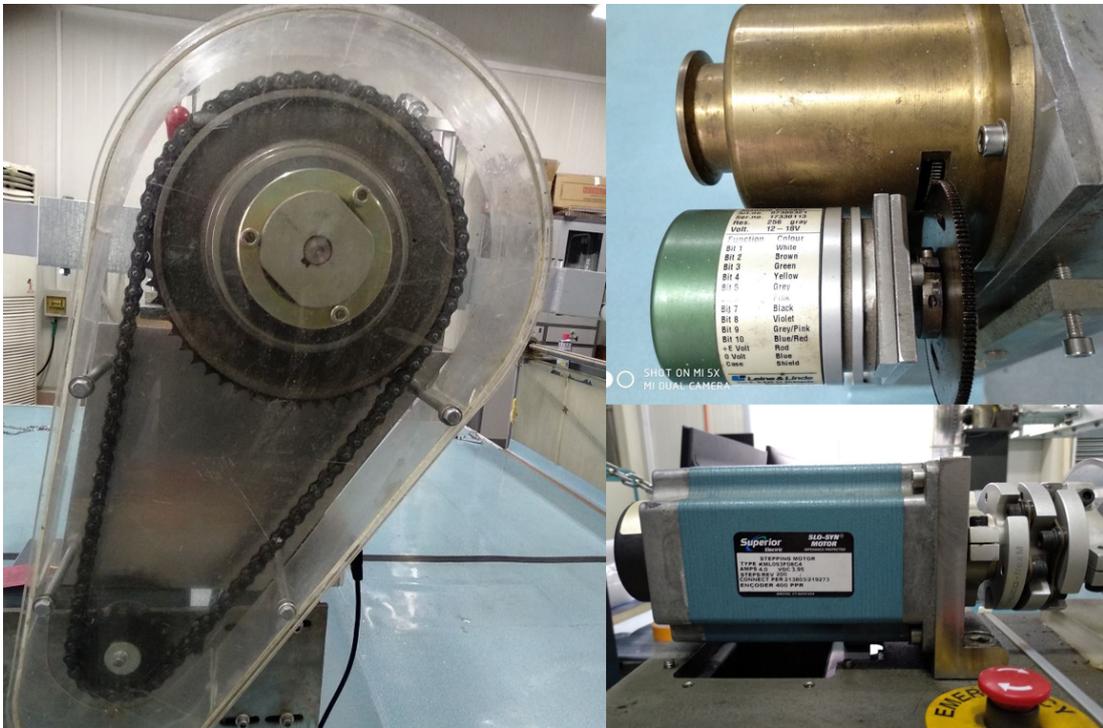


图 2.4: 丝间距控制部分: 为桌面电机, 编码器及步进导轨电机照片

指令，从而达到绕丝间距的控制，其控制逻辑可参考图 2.6。

2.2.2.2 丝张力控制

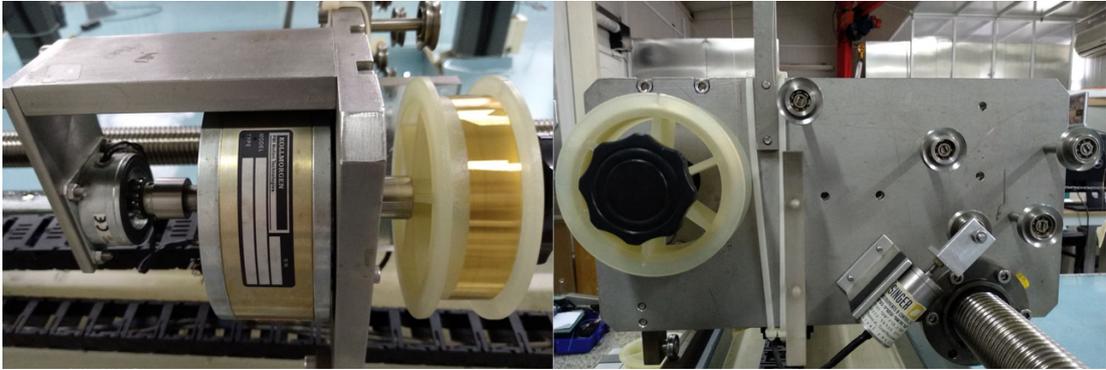


图 2.5: 张力控制部分：滑轮系统，张力传感器、丝轴及丝轴电机照片

丝张力控制是整个系统最具挑战性的功能，因为要达到比较精确的张力控制，需要多个部件的配合、对每个部件的精心设计以及对控制算法的优化。图 2.5显示的是决定丝线张力的部件，其中左图显示的丝轴和丝轴电机；从右图中可以看到滑轮系统和张力传感器。丝轴电机用于与桌面电机配合，给丝线相应的张力补偿，使得丝线张力处于被要求的范围之内；其中滑轮机构可以使丝线更好更顺滑地往桌面丝框上输送丝线；张力传感器可以实时反馈丝线的张力，计算机根据张力的变化对丝轴电机进行反馈调节，如此达到张力控制的目的。该系统张力控制由成熟的模拟 PID 算法 [33] 来负责调控各部分之间的运动，并达到张力控制的目的。设绕丝设定张力为 T_0 ，张力传感器的反馈张力为 T ，则张力偏差为 $e(t) = T - T_0$ ，则有系统根据 PID 算法得到的对丝轴电机的实时控制信号(电压输出)为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

式中， K_p 为比例系数， K_i 为积分时间常数， K_d 为微分时间常数。每个系数分别与误差 $e(t)$ 分别组成比例单元(P)、积分单元(I)和微分单元(D)，即组成了所谓的 PID 算法，如图 2.6所示。对于张力控制来说，为不使设定值与张力传感器的反馈值的误差 $e(t)$ 出现累积效应，则系统的张力采样率需要越快越好，这样才能保证及时地纠正丝张力的变化。通过 PID 算法的控制闭环回路可以看到，整个张力控制并没有将桌面电机 (Winding motor) 考虑进来，桌面以恒定的速度转动，其旋转力矩以及相对于丝轴的瞬时速度会随着桌面的旋转角度而发生变化，而系统的采样率是不变的，这就造成了算法纠正效果在时间或者是在不同的桌面角度上出现了不均匀性。

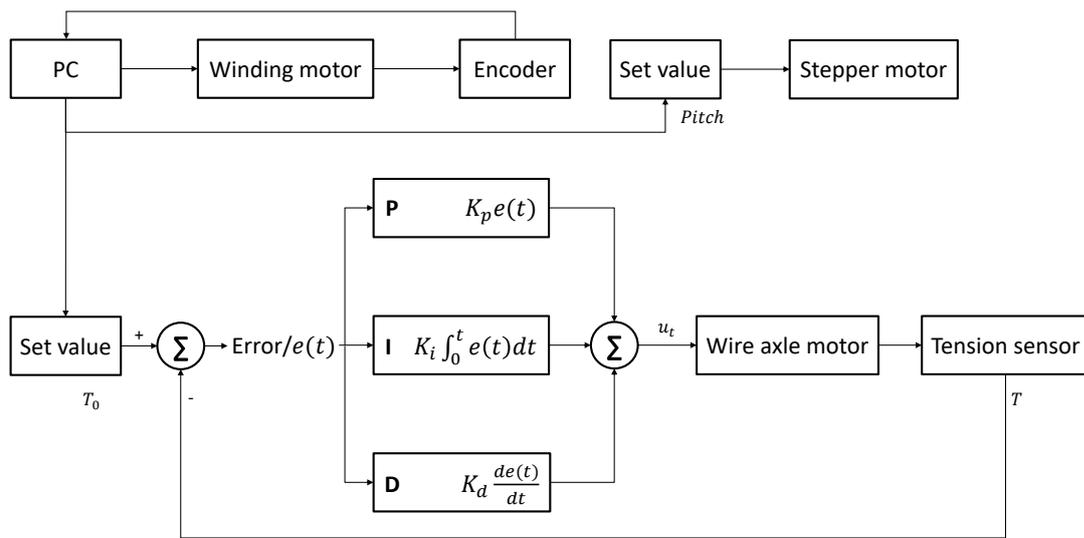


图 2.6: 绕丝系统间距与张力控制逻辑与算法

2.2.3 张力传感器标定

张力传感器本身是通过机械伸缩来反馈张力的大小，将机械信号转化为电信号，传感器随着时间的推移以及工作环境的影响，其对张力的反馈可能会发生一定的变化，所以对张力传感器的标定就显得尤为重要。标定的方法是，用

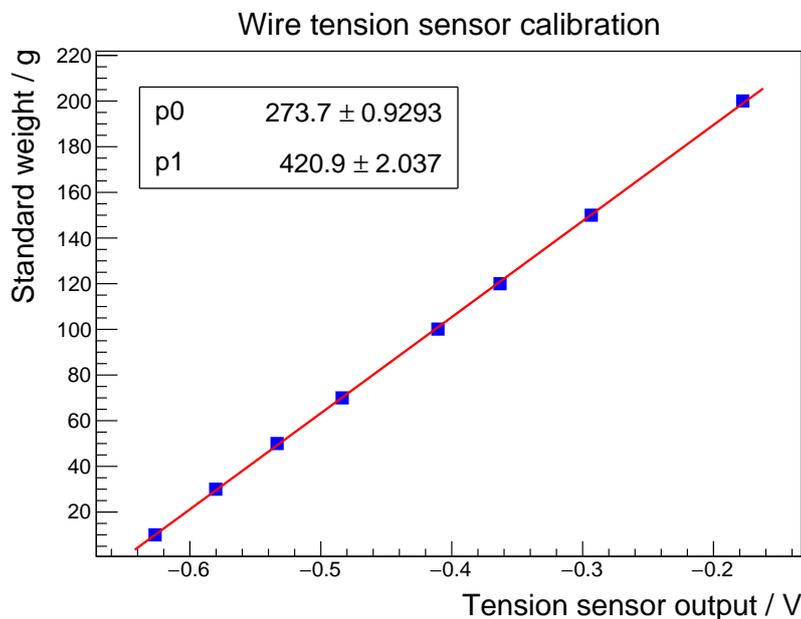


图 2.7: 张力传感器标定曲线

标准重量的砝码来给张力传感器提供一个拉伸力，然后得到相应的电压反馈，通过不同重量的砝码可得到一个张力与传感器输出电压的曲线。通过该曲线就

能得到传感器所反馈的真实张力值，图 2.7显示的张力传感器标定曲线，横轴为张力传感器的输出电压，纵轴为所加的标准砝码重量。通过曲线可以发现，该传感器在 0 ~ 200g 的范围内都呈现一个线性变化，最终拟合得到的传感器输出电压与张力的关系为：

$$T = 420.9v + 273.7 \quad (2.2)$$

然后将标定好的张力曲线导入控制程序中，张力控制算法会根据较为准确的标定关系得到更加准确的反馈值，从而间接得使得设定值与真实值之间符合得更好。

2.2.4 张力监控

前面提到，张力传感器可以实时反馈(约每秒 1~2个数据点)，图 2.8显示的是阳极丝框绕丝张力实时数据，图 2.9a 显示的是实时张力的统计分布，通过这两副图可以看到，实时张力的变化还是比较大的，远大于我们要求的阳极丝绕丝的精度要求 ($\pm 0.3N$)。但是要考虑到的一点是，桌面在整个旋转的过程中，

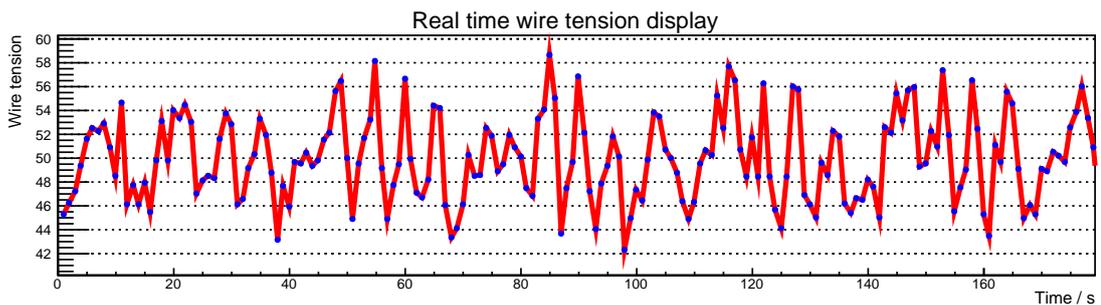


图 2.8: 绕丝张力实时监控

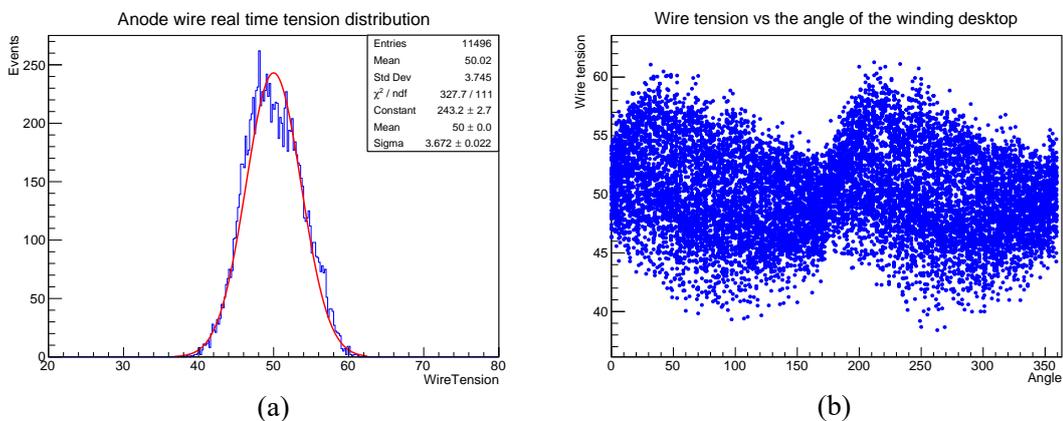


图 2.9: a 实时张力数据统计分布；b 绕丝张力随绕丝角度的变化

其旋转力矩或者是瞬时速度是不一样的：当旋转桌面角度为 90° 或者 270° 的时

候其作用力矩是最大的，而当角度为 180° 或者 360° 的时候，其作用力矩或者是旋转速度相对较小，而对于张力控制部分来说，当系统的旋转速度越慢时，系统张力控制越精确或者是越容易达到理想值。图 2.9b 显示的是绕丝张力随角度的变化，可清楚地看到，在角度为 180° 或者 360° 的地方，其张力浮动明显降低，也正是在这两角度的时候阳极丝正好落在丝框上，此时的丝张力分布才能较为准确地反应丝框上的丝的真实张力。以上对绕丝过程中丝张力的监控，不仅可以很好地帮助我们检验绕丝过程中张力的浮动情况，还可以帮助我们检验绕丝机张力的收敛性。

2.2.5 丝框绕制

丝框绕制的一般步骤是先将一对空丝框安装到绕丝系统的绕丝桌面上，然后设置好绕丝参数，包括绕丝数、张力和间距，则可自动绕制。图 2.10 显示

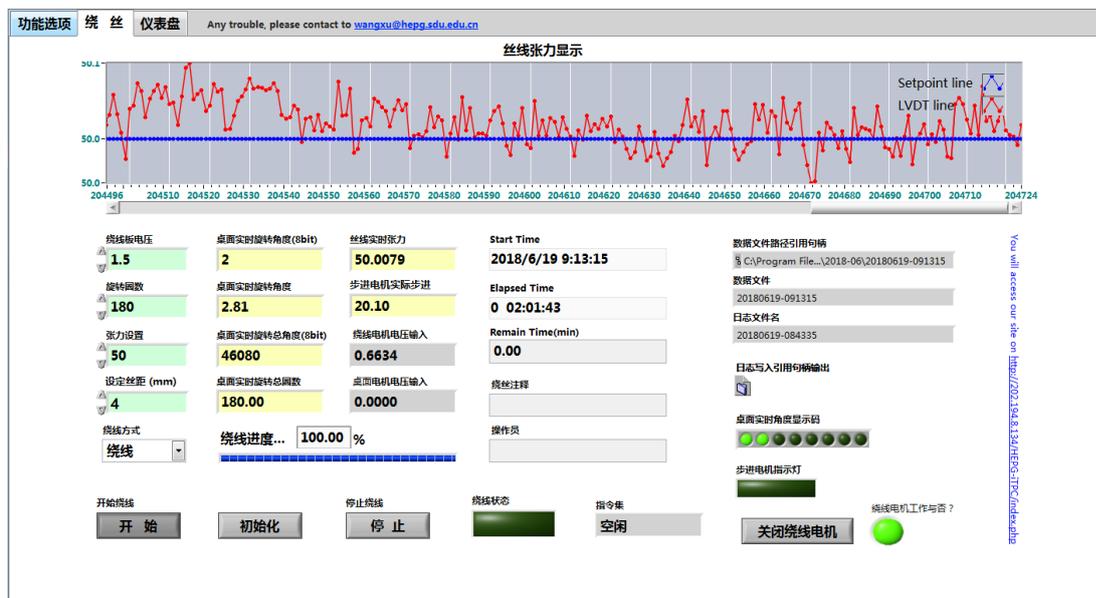


图 2.10: 绕丝系统控制界面及相关设置

控制系统界面，绕制丝框之前，需要先设置好以下参数：(1)绕丝速度，即绕丝桌面电压，阳极丝绕制一般设定为 1.3V，而阴极丝和门极丝绕制一般设置为 1.5V。该电压决定了绕丝桌面的旋转速度，从而决定了整个绕丝过程的快慢，该值越小，则绕丝越慢，越大，则绕丝越快。如果太慢，则容易出现断丝的情况，太快，则丝张力控制会出现较大的浮动。通过图的最上可以看到张力传感器所传回的实时张力变化，可通过查看该实时张力的浮动宽度来判断绕丝张力质量。(2)绕丝张力设置，阳极丝框绕制，设置为 51g。对于阴极丝和门极丝框绕制来说，因为其丝面丝的数量太多，张力太大，一个丝框大概承受的压力在 85kg 左右，因丝框中间部分没有支撑结构，就会导致丝框的中间部分凹陷，从

而造成中间部分的丝线张力降低。所以阴极丝和门极丝绕制则要分别通过导入特定的张力曲线，来补偿中间部分的降低。一般该两层丝补偿之后的张力中心值在 125g 左右。(3) 间距和丝数分别根据各层丝的要求设定。在丝线绕制完成后，在丝与丝框的接触部分涂上环氧聚酯胶并静置 12 小时，待等到两面丝框的环氧胶完全晾干后，进行丝框张力的检验。

2.3 丝张力及丝间距测量系统

2.3.1 丝张力测量原理

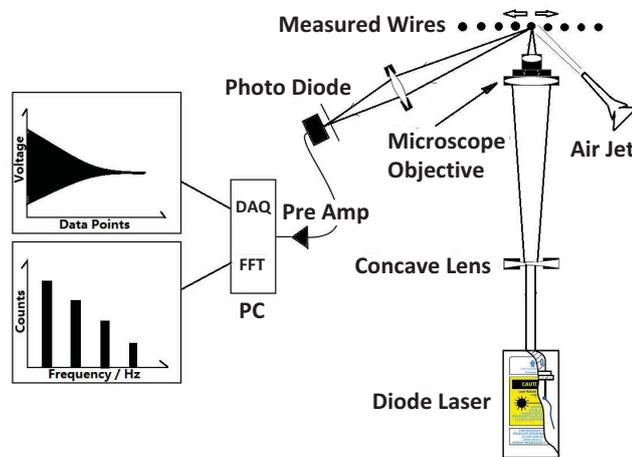


图 2.11: 丝张力测量原理图

我们知道丝的振动信息可以传递丝张力的大小，即由丝的振动频率和丝的本身的一些性质可以得到丝的张力大小。具体的假设一根丝的长度为 l ，线密度为 μ ，振动基频为 f_0 ，则有丝的张力可以表示为：

$$T = 4\mu l^2 f_0^2 \quad (2.3)$$

对于一个绕制好的丝框来说，我们已知参数有：丝框上丝的长度，丝的线密度，只要我们测得丝的振动频率即可得到丝的张力大小。所以该系统的关键就是(1)对丝的振动信号的捕捉；(2)丝振动频率的抽取。图 2.11显示的是丝张力系统的测量原理 [34]，丝的振动捕捉是通过一光学平台和光电转化模块实现的。具体的，激光器发射激光通过透镜阵列聚焦在丝的表面，压缩空气的喷出可以使得丝振动起来，丝面的反射光强会随着丝本身的振动而发生变化，光电二极管再把变化的光信号转化为变化的电压信号传送到计算机上，从而实现了丝的振动捕捉。再根据相应的算法实现丝振动频率的抽取，从而得到丝的张力。

2.3.2 测量系统构成

图 2.12显示的是丝张力测量系统的实景照片，该系统主要有：控制计算机、光学平台、步进导轨、光栅尺、压缩空气喷嘴、丝框和探测器固定装置等部分构成。光学平台由固体激光器、光学聚焦透镜阵列和光电转换模块构成，

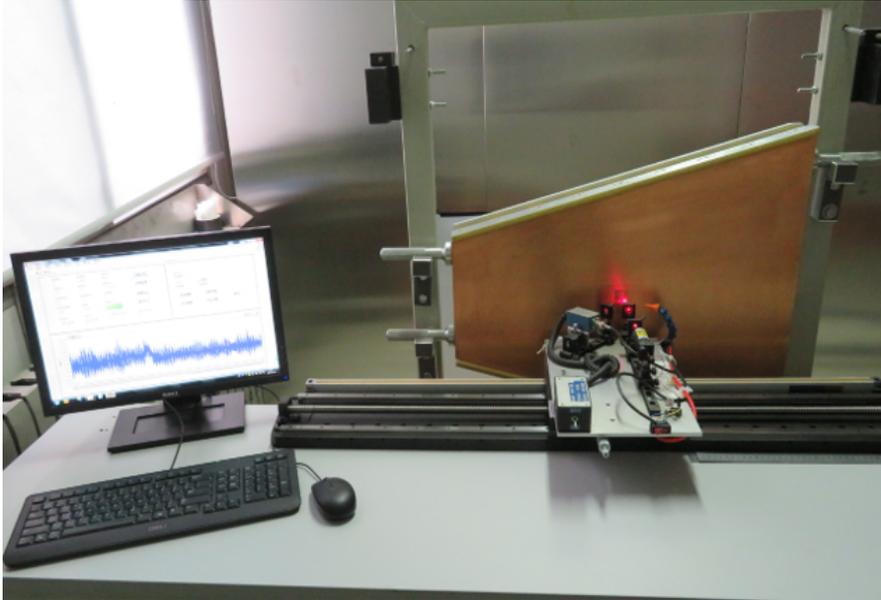


图 2.12: 丝张力测量系统实景照片

其安装在步进导轨上，如图 2.13所示。固体激光器可以产生功率较低的激光光束，透镜阵列可以将固体激光器发射的激光聚焦到丝平面上，然后反射并聚焦到光电二极管的光入口。另压缩空气喷嘴依附于光学平台上，当步进导轨停止，激光光斑聚焦在丝面上时压缩空气喷向丝面，此时丝便会产生振动。另外，光栅尺可以实时反馈光学平台的位置信息，可用于丝间距的测量。

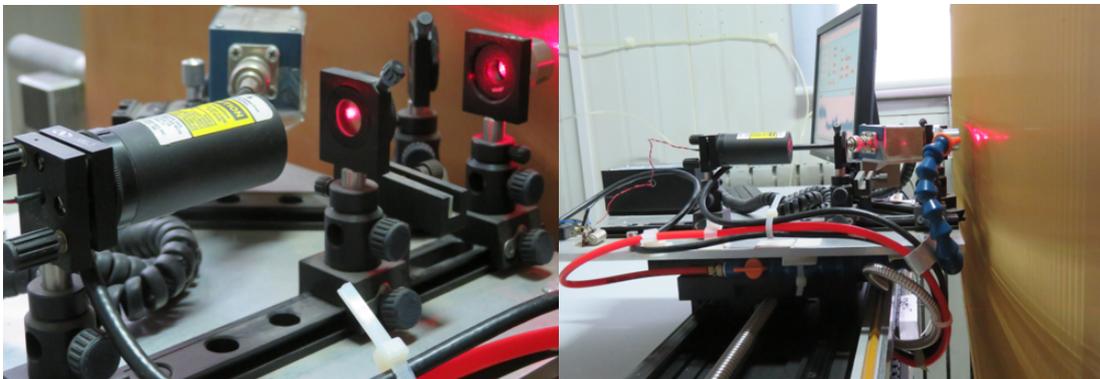


图 2.13: 丝张力测试系统光学平台

2.3.3 基于 FFT 算法的振动频率抽取

光电转化模块将光强信号转化为模拟的电压量，该模拟值会通过 NI 数据采集卡数字化并传送给计算机。一般的我们已知利用傅立叶变换可以从一组周期性变化的数据点抽取到无穷多个频率出来。因为单位时间内数据获取模块所获得的数据点较多，如果采用一般的离散型傅立叶变换算法从海量的数据点中抽取到丝振动的频率是很耗时的。一个高效的离散傅立叶分析算法 FFT 即快速傅立叶分析可以准确快速的帮助我们抽取到相关频率。比如一般的对于一个长度为 N 的数据序列 $x(n)$ 来说，利用离散傅立叶变换 [35] 得到：

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn}, 0 \leq k \leq N - 1 \quad (2.4)$$

其中，

$$W_N = e^{-j2\pi/N} \quad (2.5)$$

对于丝振动频率的抽取来说， $x(n)$ 是光电模块所反馈的电信号，所要抽取的频率即为 $X(k)$ ，FFT 算法利用了相位因子 W_N 的对称性和周期性即：

$$\begin{aligned} W_N^{k+N/2} &= -W_N^k \\ W_N^{k+N} &= W_N^k \end{aligned} \quad (2.6)$$

使得离散傅立叶的计算变得非常高效。

对于丝的振动来说，会形成不同模式的振动驻波，各驻波间的振动频率为倍数关系，所抽取的频率包括基频、复频、第三频率直至 N 频，在丝张力的计算中我们所用的数值是基频值。图 2.14a 显示的一根丝的振动信号，b 显示的利用 FFT 算法得到丝振动的频率，能够清晰地看到基频和其他倍频。利用公式 2.3 便可计算得到当前丝的张力。

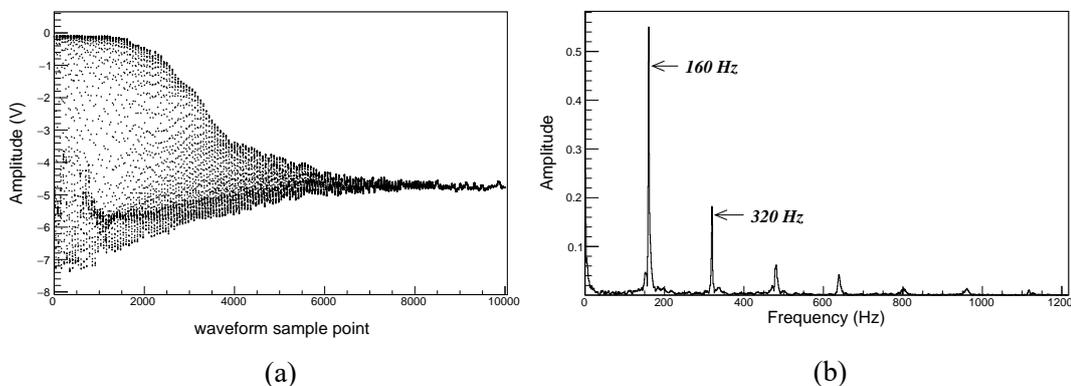


图 2.14: a 丝振动波形；b 利用快速傅立叶算法所抽取到的丝振动频率

2.3.4 张力测量系统检验

对于一个测量系统来说，检验其是否能够正常工作，是否能够准确地反映被测量值的大小是其应用的前提。对于该张力测量系统的准确度检验的方法是，利用系统去测量已知张力的丝，如果能够与已知量较好地吻合则说明系统能够正常准确地工作。首先是制备特定张力的丝，方法是利用标准重量的砝码来拉制标准张力的丝。图 2.15 显示的是利用 50g 的砝码来拉制 $20\mu\text{m}$ 的阳极丝。同样的方法可以制备不同张力的丝，因为系统所测试的为 iTPC 用丝，所



图 2.15: 利用标准重量砝码来拉制特定张力的丝。

以制备了不同张力的 $20\mu\text{m}$ 阳极丝和 $75\mu\text{m}$ 阴极或门极丝。图 2.16 显示的制备好的丝振动测量结果，横轴是丝的张力，纵轴是测量系统所抽取的到的丝振动频率的平方，而由公式 2.3 可知频率的平方恰好与张力成一线性关系。测量结果较为准确地反应了这一原理的数理特征。

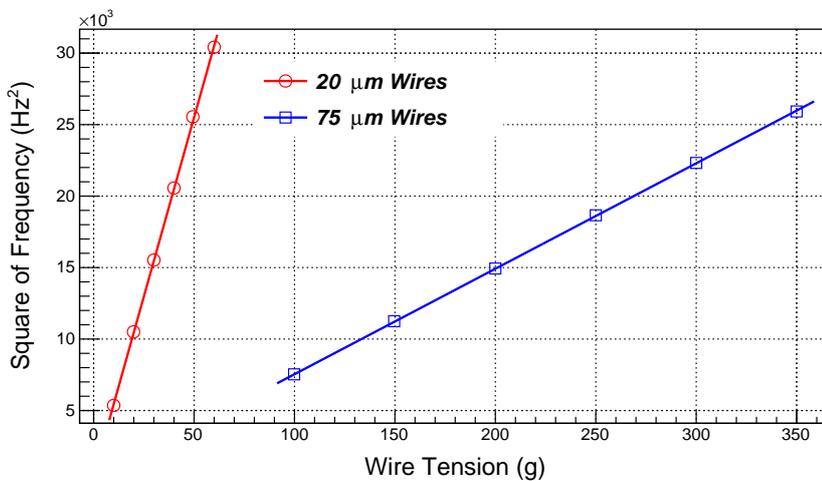


图 2.16: 不同直径不同张力丝振动的测量结果

另外，由抽取到的频率可计算得到相应张力下的测量结果，系统如果足够稳定，还应该具有良好的可重复性。图 2.17 显示的是标定张力为 50g 和 120g 的阳极丝和阴极丝的测量多次结果，无论是从测量张力的精确度上还是重复测量精度上都反映出该系统能够准确稳定地完成丝张力的测试工作。

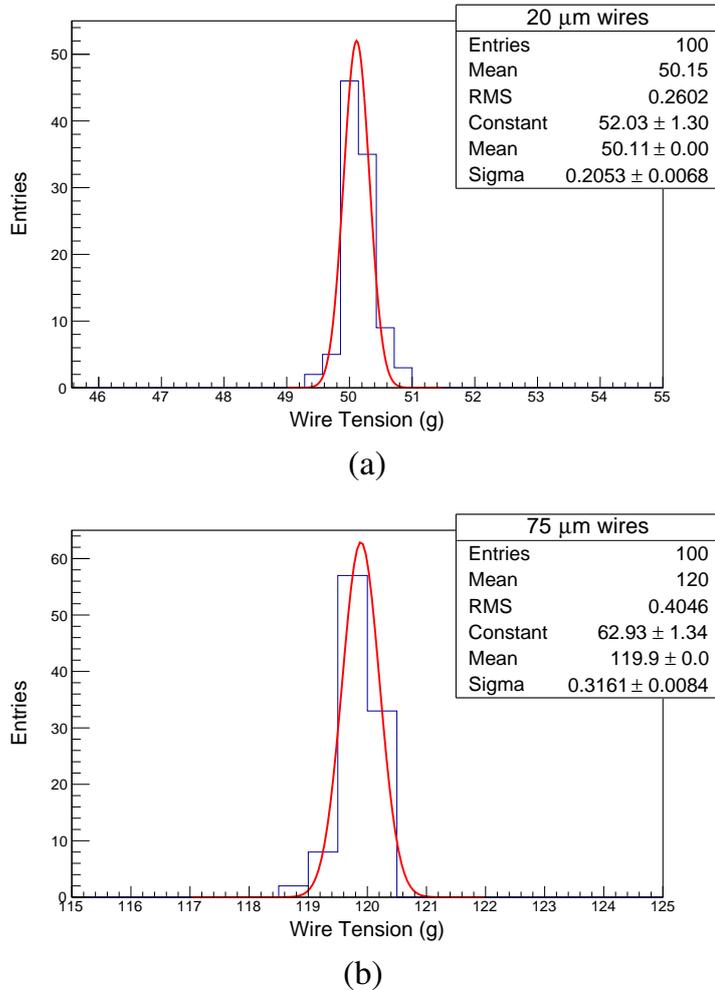


图 2.17: 不同直径不同张力丝的重复测量结果

2.3.5 张力测量的误差分析

对于丝张力测量系统来说，其测量误差主要来源于张力计算公式 2.3 中的三个参数：(1) 丝的线密度 ρ_{1d} ；(2) 丝的长度 l ；(3) FFT 抽取的频率 f ；(4) 振动阻尼对振动的影响。以 75 μm 的铍铜丝(用作阴极和门极丝)为例，首先对丝的线密度来说，其线密度的浮动范围为 40.0mg/m~41.0mg/m，测试时所输入的为线密度分布均值，即 40.6mg/m。则有对于不同张力的铍铜丝来说，其所

测得的张力浮动可参见图 2.18a。由图可见，铍铜丝线密度的不均匀性可使得 120g 的张力测量值有 $-1.2g \sim +1.8g$ 的浮动。在实际的测量中，该值作为一固定常数输入到测试程序中，故测试系统所带来波动不依赖这一项。

其次对丝的长度来说，测试时所用的丝框长度为 108.6cm，测量误差为 $\pm 1\text{mm}$ 。图 2.18b 显示的铍铜丝长度浮动带来的张力波动。对于 120g 的铍铜丝来说 $\pm 1\text{mm}$ 的长度浮动会带来 $\pm 0.2g$ 的张力波动。同样，该值也是作为一固定常数输入到程序中的，测试系统带来的波动也不依赖这一项。

对丝振动抽取的频率来说，FFT 所抽取的频率精度为 $\pm 0.1\text{Hz}$ ，图 2.18c 显示的是频率精度所带来的张力波动，对 120g 铍铜丝来说，有 $\pm 0.3g$ 的张力计算波动。这一项是系统所测得的，其值依赖于频率的抽取精度和信号质量的好坏，故系统测量的波动或者可重复性依赖抽取频率的精度和信号质量的波动上。但当系统所获取的振动信号饱满清晰的时候，所抽取的频率波动基本可以忽略。

考虑到真实情况下，丝的振动会存在一定的阻尼，丝振动的波形会在阻尼的作用下呈现出衰减的趋势。该趋势会对丝振动频率的提取有一定的影响，要量化这一影响才能确定阻尼效应所带来的测量误差。一般对于一个理想的无阻尼振动来说，其振动方程为 [36]：

$$S = A_0 \sin(\omega_0 t + \phi) \quad (2.7)$$

带阻尼的振动方程为：

$$S = A_0 e^{-\beta t} \sin\left(\left(\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}\right)t + \phi\right) = A \sin(\omega t + \phi) \quad (2.8)$$

式中， A_0 为振动的初始幅值， ω_0 为无阻尼情况下的振动频率， β 为阻尼系数。通过波动方程可以看到，当存在阻尼振动的时候，波形的幅值在逐渐降低，波动的周期或者是频率也较理想值低。阻尼系数是流体的粘滞表征，对于丝的振动来讲，其主要源于空气阻力。要求得阻尼系数 β 才能得到理想情况下的振动频率，从而对无阻尼和有阻尼状态下进行张力计算值的比较。设阻尼振动的初始波幅为 A_0 ，在 t 时刻变为 A ，则有：

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\beta t} \\ \beta &= -\frac{\ln \frac{A}{A_0}}{t} \end{aligned} \quad (2.9)$$

所以只要知道初始波幅 A_0 ，得到某一时刻 t 的波幅 A ，那我们就得到了某一振动波形的阻尼系数 β 。对于理想的阻尼振动来说，阻尼系数是一恒定值，但对于真实情况来说，其振动波形存在一定的不规则性，阻尼系数 β 存在一定的波动。实验中我们标定了 3 根 120g 的丝。系统设定的波形图采样点为 10000 个，图 2.19 显示的是同一根丝的振动幅值衰减情况，横轴为采样点，纵轴为波

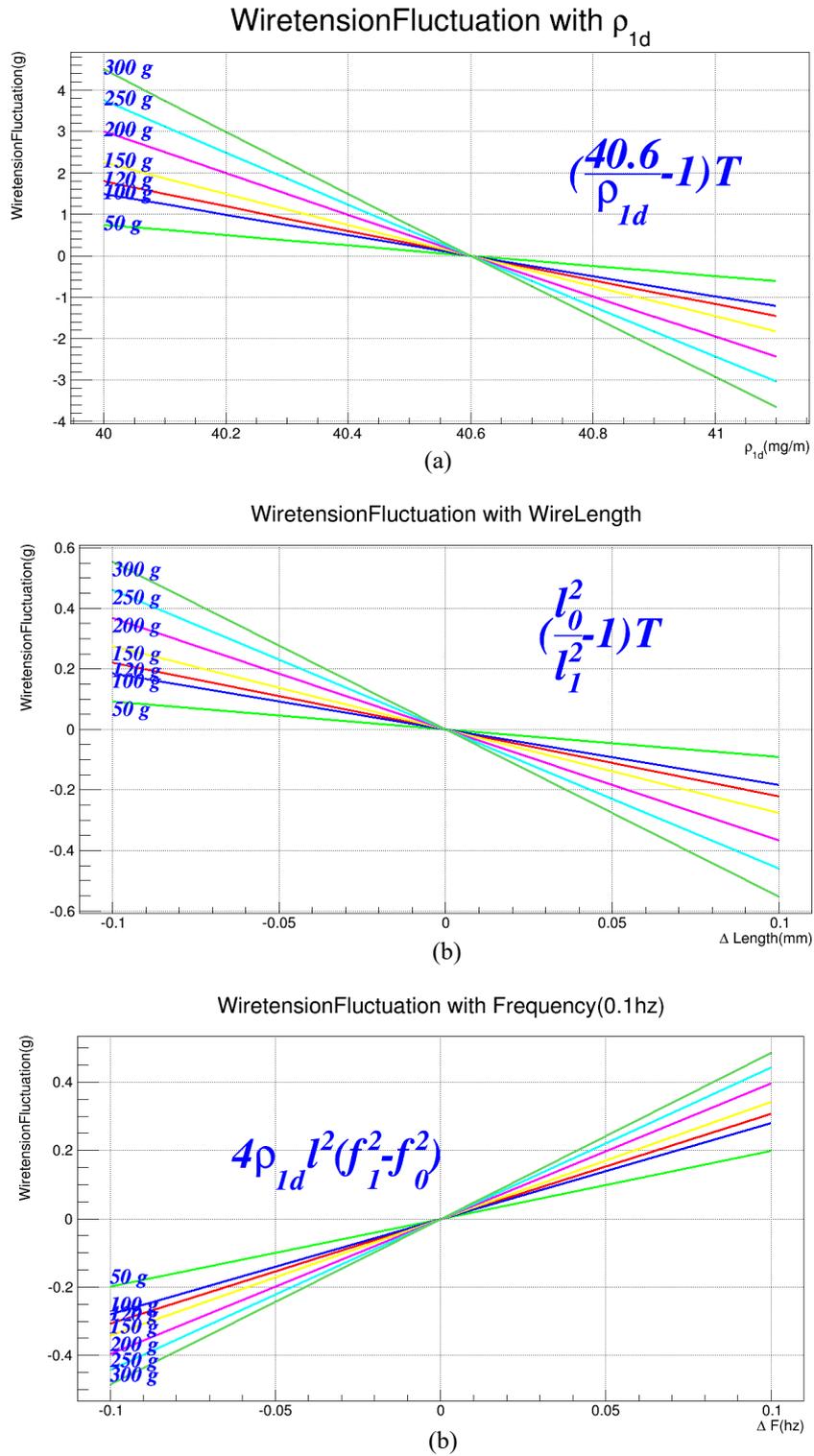


图 2.18: a 铍铜丝线密度对丝张力测量误差贡献; b 铍铜丝线长度测量对丝张力测量误差贡献; c FFT 算法所抽取的丝振动频率浮动引起的张力波动

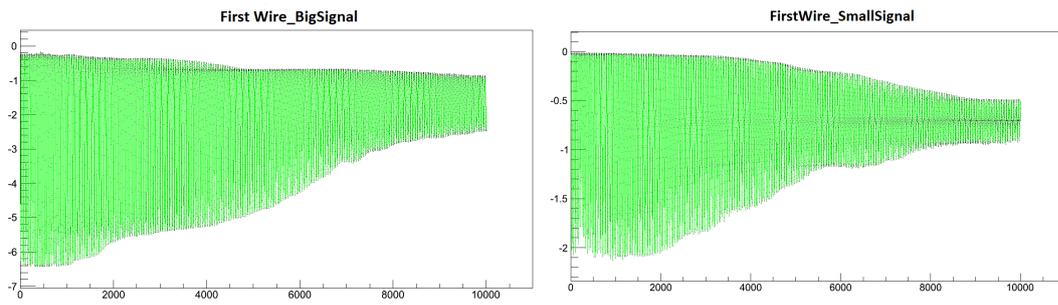


图 2.19: 相同丝在不同的起振幅度下的振动衰减波形图

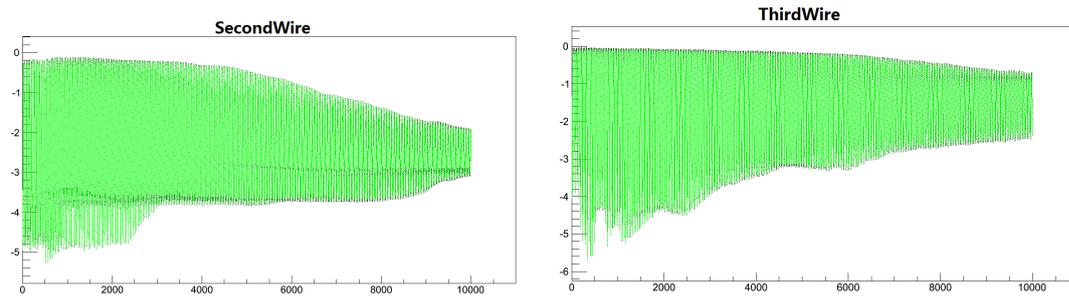


图 2.20: 不同丝在相同的起振幅度下的振动衰减波形图

幅，两图的区别是丝振动的起始幅度不同。图 2.20显示的是不同丝在相同的起振幅度的下的波形衰减图。通过公式或者算法 2.9可以得到这四幅振动波形的

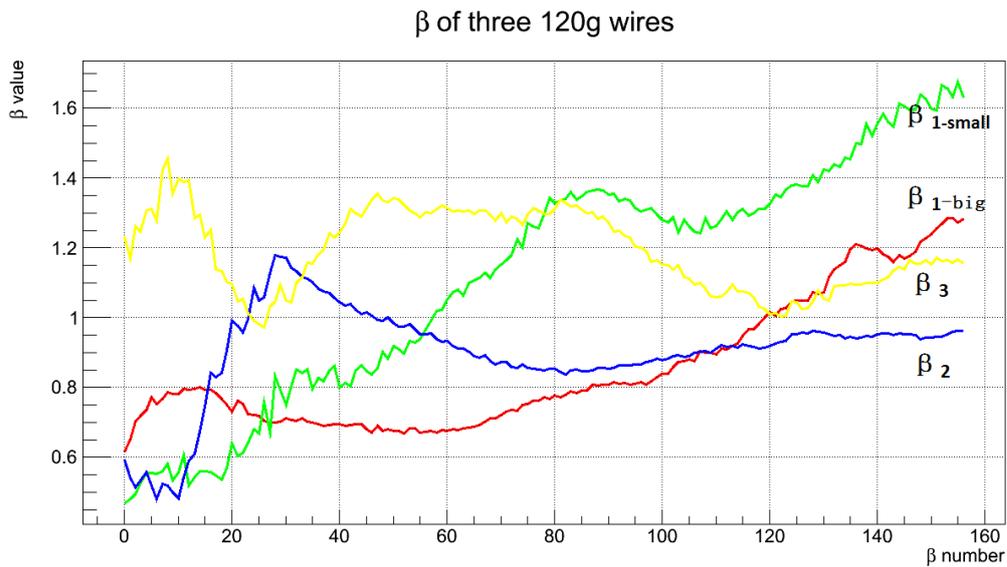


图 2.21: 从相同张力，不同丝的阻尼振动所得到的阻尼系数的变化曲线

β 值随着振动波形衰减的变化曲线，如图 2.21。可以看到，阻尼系数的波动范围为 $0.5 < \beta < 1.7$ 。已知 120g 的丝振动所抽取到的频率为 266Hz，假设阻尼

系数为 2.0，则可得阻尼振动频率 ω 与真实频率 ω_0 之比为：

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{266 \times 2\pi}{\sqrt{(266 \times 2\pi)^2 + 2^2}} = 0.99999928 \quad (2.10)$$

将阻尼系数变化所带来的抽取频率浮动考虑到张力的计算中，其张力差为 0.000176g，可认为阻尼效应对丝张力的测量基本没有影响。

综合以上，对于一个待测丝框来说，整个丝面张力的均匀性依赖于丝长度均匀性、丝的线密度的分布均匀性。对于 $20\mu\text{m}$ 和 $75\mu\text{m}$ 的丝来说，各参数误差所传递出来的张力计算值与真实值之间的标准差误差分别为 0.3g 和 0.48g，满足我们制作的要求。对于丝张力测试系统来说，其测量的可重复性主要依赖于对丝振动频率的抽取，而这一部分所带来的波动对两种丝的测量来说是不大于 $\pm 0.4\text{g}$ 的。

2.3.6 基于光栅尺及光强信号的位置信息获取

对于丝间距的测量来说，因为光栅尺可以实时记录光学平台的位置，结合光电模块所得到的丝平面的光强反射信息，就能得到丝的位置信息，从而根据位置信息得到丝间距分布。图 2.22 显示的是在丝间距扫描过程中，系统获取的反射光信号强弱变化，纵轴表征光强，横轴为丝的相对位置。丝面是一个圆柱面，激光斑点在丝面上的移动必然导致反射光强的变化，这一部分变化经过光电转换模块转化成了负电压信号的变化，反射光越强，电压信号越大，反之则越小，最后形成一个细条状的反射信号峰。在某一电压高度上同一根丝存在两个数据点，取该两个数据点的中心所对应的横坐标作为该丝的相对位置。将所有丝的位置进行统计分析便能得到丝间距分布。

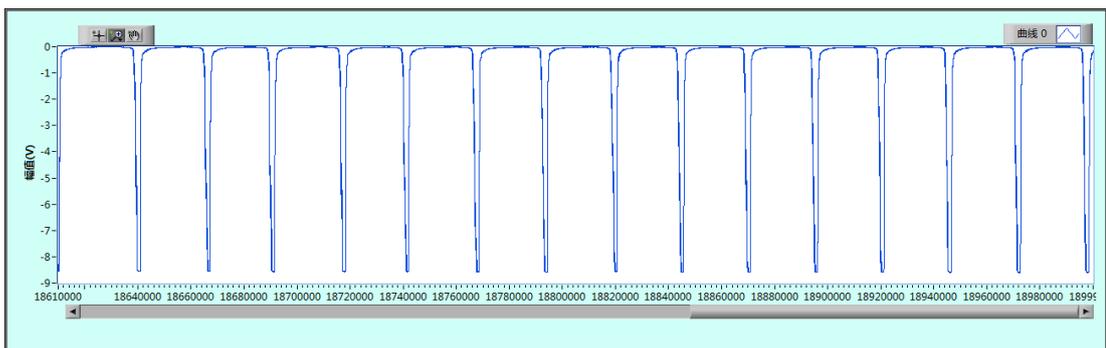


图 2.22: 丝间距扫描过程中光强信号的变化

2.3.7 丝张力及丝间距测量

前面提到在丝框绕制完成后要对其张力做一个丝面扫描，另外当每一层丝安装到探测器上之后也要对安装完成的丝面进行张力、间距的测量。图 2.23 显

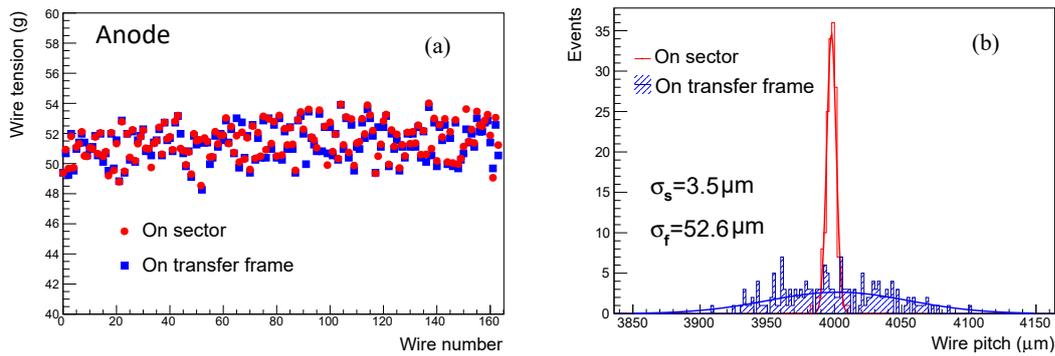


图 2.23: a 利用丝张力测试系统测得的阳极丝框和落丝安装后阳极丝面张力分布对比; b 阳丝间距测量结果对比

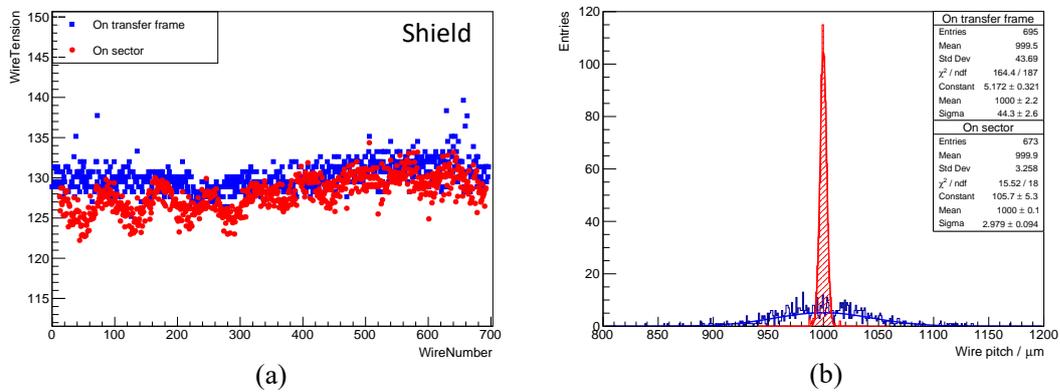


图 2.24: a 利用丝张力测试系统测得的阴极丝框和落丝安装后阴极丝面张力分布对比; b 阴极丝间距测量结果对比

示的是阳极丝框和落丝安装完成后探测器上阳极丝面的丝张力和丝间距测量结果对比。图 2.24显示的是阴极丝框和落丝安装完成后探测器上阴极丝面的丝张力和丝间距测量结果对比。可以看到丝面安装到探测器上之后，其张力都能落到相应的精度要求范围内，其丝间距均匀性更是得到了极大的提升。丝面安装涉及到的相关专业设备和质量控制技术可参见下节。

2.4 落丝系统及功能

落丝系统主要由高平整度的大理石平台、丝梳系统、丝框位移装置、丝面检查设备、涂胶设备构成。图 2.25 是落丝平台照片。落丝系统的各部分集成到大理石台子上，iTPC sector 置于系统的中央，落丝时将丝框覆盖整个探测器，考虑到多丝室的每层丝的位置，包括水平方向以及上下方向都是固定的，落丝时利用丝梳系统和丝框位移系统来完成整个丝面的定位。图 2.26a 显示的是落

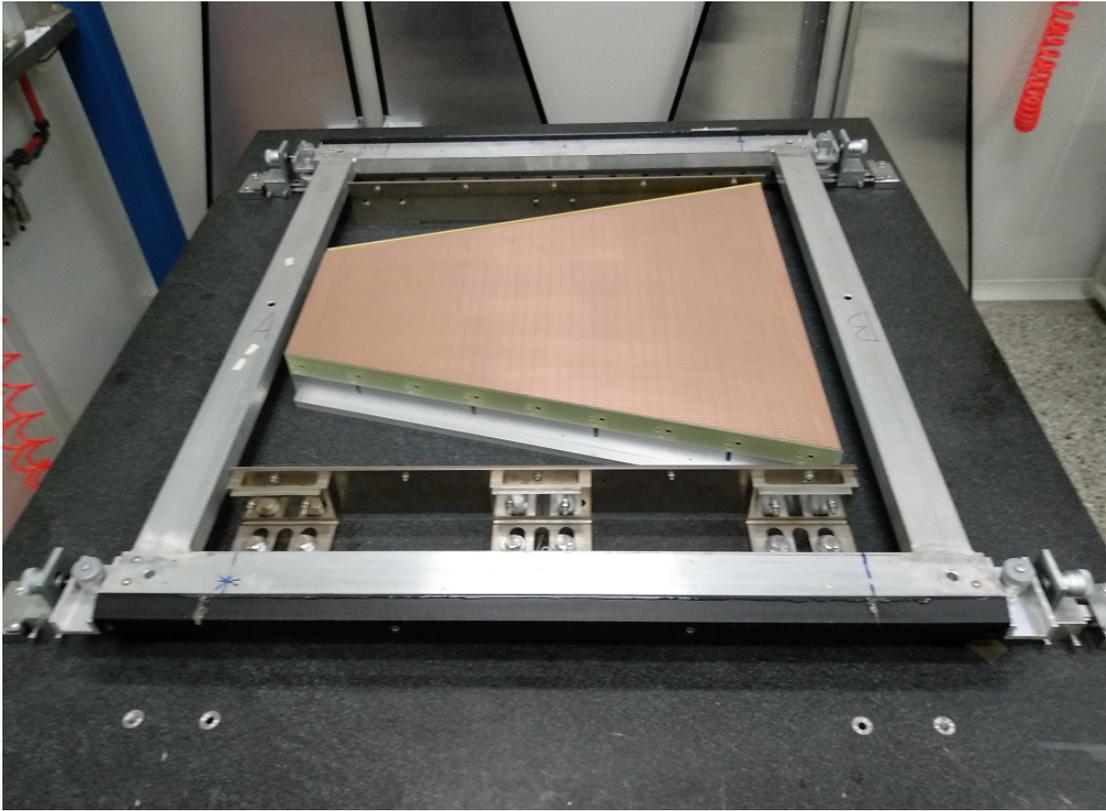


图 2.25: 落丝平台照片

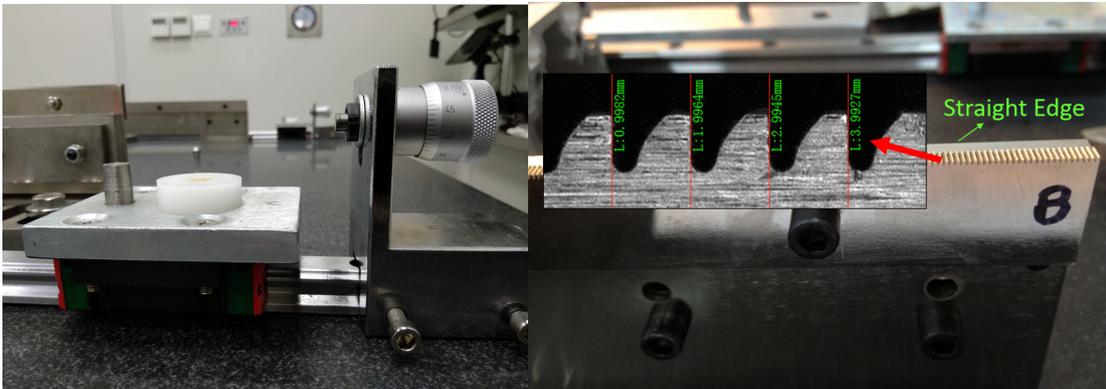


图 2.26: a 丝框位移装置；b 丝梳系统

丝位移装置及丝梳系统照片。其中丝框位移装置由平行放置的移动导轨、丝框托盘、以及微分控制器组成。其中丝框托盘用于安放和固定丝框，平行移动导轨可以限制丝框平行移动，微分控制器可以控制丝框在水平方向上的微位移和倾斜角度调节。图 2.26a 显示的是丝梳系统 [37]，其由丝梳、Straight Edge 及固定装置构成，丝梳用来控制丝间距，Straight Edge 用来控制丝面的高度。其中红箭头放大部分为丝梳梳齿的显微照片，落丝时丝紧贴梳齿的垂直边，其梳齿间距精度远好于 $10\mu m$ 。Straight Edge 紧贴丝梳固定，其高度依每层丝的高

度而变化。在安装丝梳系统时需要注意的是，一定要将梳齿高度调节至落丝时丝能触碰到 Straight Edge 的上表面，否则达不到控制丝面高度的效果。图

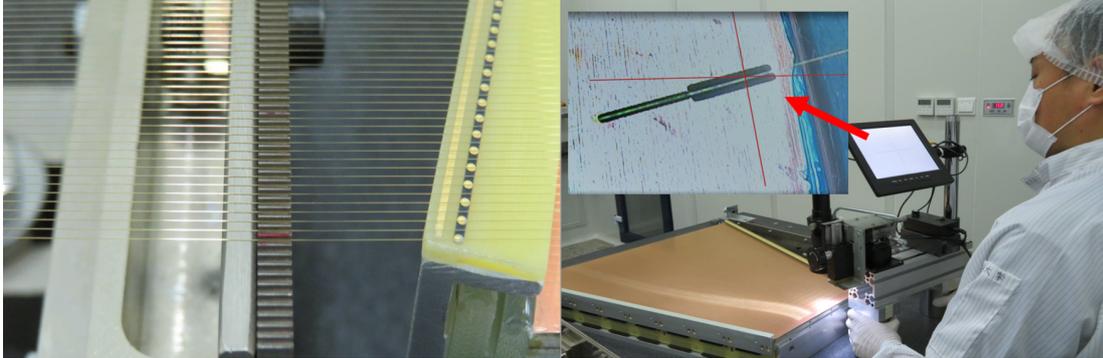


图 2.27: a 落丝完成后丝面相对丝梳系统的位置；b 利用显微镜对丝面位置进行复检

2.27a 显示的是落丝完成后丝面相对丝梳系统的照片，可以看到丝都落到了丝梳梳齿内，且触碰到了 Straight Edge 的上表面。b 显示的是落丝效果检查，当用肉眼观察到丝面安放到位时，需用显微镜来检验丝的位置。iTPC sector 的 Pad plane 有丝的定位槽，可通过丝与该槽的相对位置来确定整个丝面相对 Pad plane 的位置。

2.5 iTPC 制作流程及质量控制体系

由上一节可知落丝过程是一个比较繁琐复杂的过程，落丝过程中每一大步都包含了众多的小步，每一小步之间又能够配合连贯紧密才能达到理想的落丝效果。对于整个探测器的制作来说，制作流程化及制作过程的质量控制则就显得尤为重要。制作过程的流程化不仅可以统筹整个制作的过程，节省制作时间，还能清晰地追踪制作过程中遇到的问题，更是质量控制的基石。对于 iTPC 多丝室整个制作流程来说，共分为四大部分：(1) 丝框绕制；(2) 丝张力及丝间距测量；(3) 落丝；(4) 探测器测试。每一部分的操作空间和时间不同，整个流程的规划需要考虑到空间布局和时间的前后关系。图 2.28 显示的是整个探测器制作的流程化布局图。箭头线决定了流程的先后顺序，标号和布局分布决定了制作的空间分布。从 1 到 6 分别为超净室、清理间、和胶室、绕丝间、张力间距扫描区、多丝室性能测试区。整个流程的起点是丝框及丝轴的准备处，流程中间可以看到夹杂着文件处理环节，该环节即为质量控制检查环节。质量检查对每一步都会针对性的提出相应的操作回顾、对象外观问题，并填写质量检查表格(Traveler)。

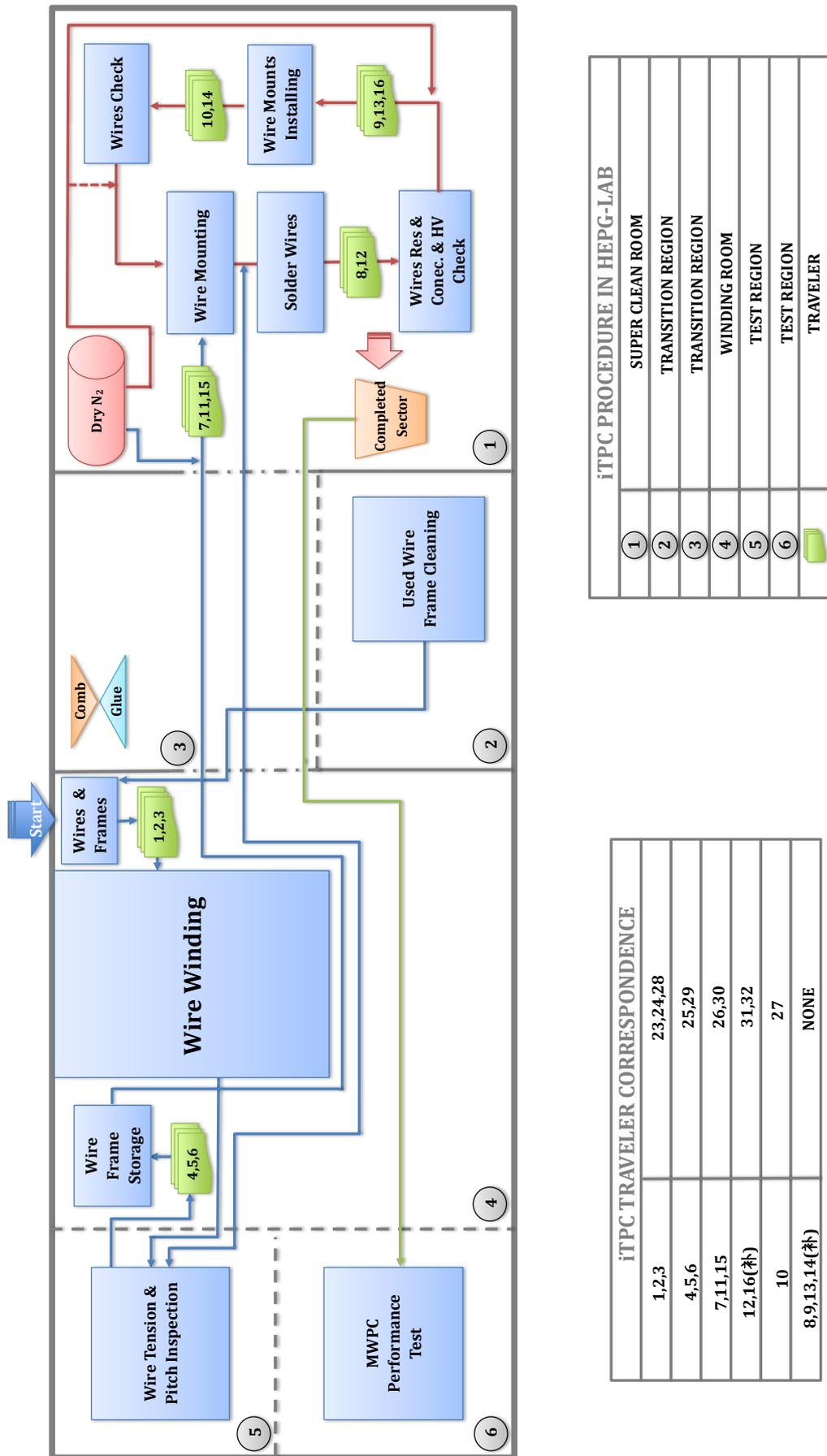


图 2.28: iTPC 制作流程布局

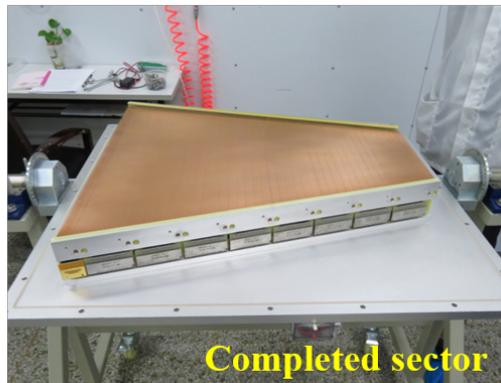
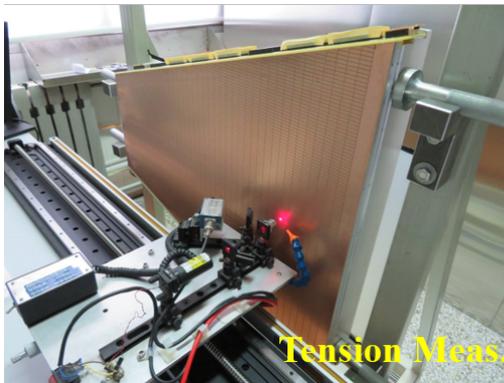
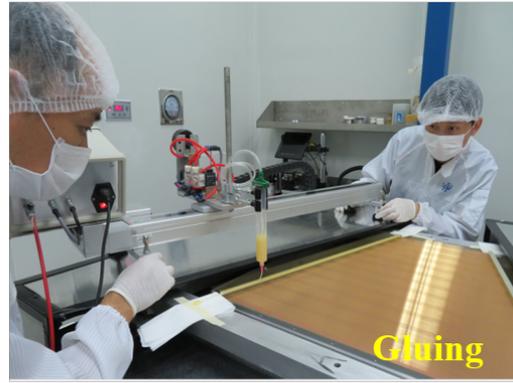
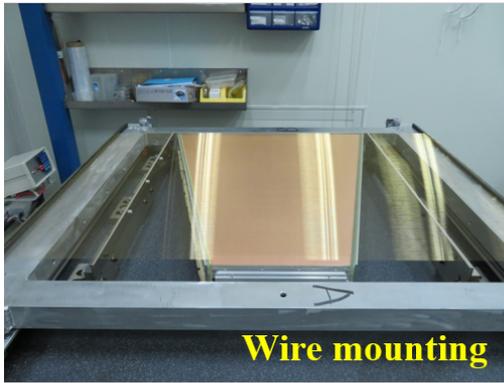
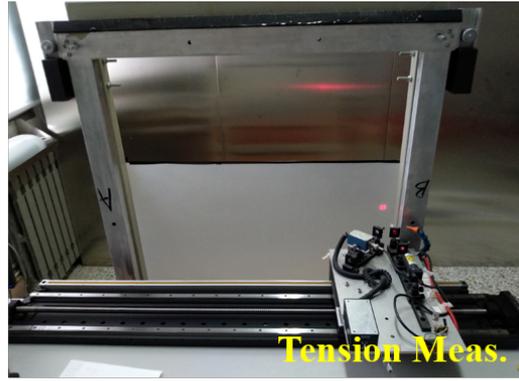


图 2.29: iTPC 制作照片

最后图 2.29 显示的是探测器制作过程的照片，在丝面位置固定好之后，要用定制涂胶设备来完成丝面的涂胶固定。该设备为自主设计涂胶机，主要由气体压力系统，步进系统和胶管固定装置构成，该设备可设定胶管移动行程，出胶压力及速度，可实现对丝面的半自动化涂胶。之后就是对丝面的焊接，连通性、短路检查，最后是装箱测试。在以上的操作流程和相关的质量检查完成之后，探测器进行性能测试，性能测试通过便装箱待运，不通过则标记并返修。

2.6 小结

iTPC 多丝室的制作是一个比较复杂的工程项目，山东大学高能物理实验室在没有多丝正比室的制作经验的情况下，自发研究和搭建了整套的制作设备和制作生产流程。目前依靠这些专业设备、科技人员的紧密配合以及缜密的质量检查，已经成功完成了过半的工程任务。本章主要介绍了如何利用绕丝系统绕制特定张力和间距的备用丝框，如何利用丝张力、丝间距测量系统来检测绕制的丝框以及落好的丝室张力和间距。阐述了张力间距检测系统的标定以及误差分析方法。介绍了如何利用专业的落丝工具实现高精度的丝室组装，如何将丝室制作进行流程化和质量控制。

第三章 基于 Garfield++ 的 iTPC 多丝室性能模拟

3.1 Garfield++ 模拟简介

粒子探测器通过粒子的运动以及粒子与探测器物质的反应来探测和研究粒子，这其中涉及到很多复杂的微观物理。包括粒子在探测器物质中的热运动、碰撞、扩散、原子跃迁以及电磁场对微观效应的影响等等。Garfield++ 是一款强大的面向对象的，用来模拟气体以及半导体粒子探测器的工具包 [38]。相对于 Garfield，Garfield++ 编程使用的是 C++ 而不是 Fortran，使用性上更加友好易用，功能调用比较简单，而且 Garfield++ 提供了高能分析软件 ROOT 的相应接口，可以直接在 ROOT 的运行环境下进行定义和使用。其主要的功能有：模拟粒子在探测器中的输运、电离能损、雪崩以及简单的电场计算。

Garfield++ 主要集成和调用了两大核心 Magboltz [39] 和 Heed [40] 的模拟功能。Maggboltz 主要用来计算电子在气体中的输运、雪崩等参数，比如电子在气体中的运动速度，空间扩散，吸附系数以及汤森系数等等。Heed 主要用来模拟高能粒子在气体中产生电子离子对的过程、 δ 电子电离能损、光子吸收以及原子跃迁等。另 Garfield++ 可以追踪相应过程的空间坐标，可以方便的重现或者视觉化该过程的空间分布。关于电场计算，Garfield++ 可以计算简单的丝室、平面电场，提供了其他复杂电场计算软件，比如 ANSYS 等的接口。

iTPC 作为一典型的气体探测器，其相应的性能和物理可以都可以用 Garfield++ 来进行模拟研究。所以本章具体介绍了，怎样使用 Garfield++ 来研究气体探测的一些物理和气体探测器的相关性能，包括模拟的基本设置，气体性能的模拟，X 光和电子在气体中的输运和能损，以及电子雪崩和探测器增益的模拟研究。

3.2 模拟设置

3.2.1 气体选择

Magboltz 可以模拟计算多种气体及其混合物的性能参数，目前可模拟的气体可参见表格 3.1 [41]。其中“*”代表了气体模型的模拟精度和可靠性，五星代表最高的模型精度和可靠性。

Symbol	Name	Rating
⁴ He	helium	*****

^3He	helium-3	*****
Ne	neon	*****
Ar	argon	*****
Kr	krypton	****
Xe	xenon	****
Cs	cesium	**
Hg	mercury	**
H_2	hydrogen	*****
D_2	deuterium	*****
N_2	nitrogen	*****
O_2	oxygen	****
F_2	fluorine	**
CO	carbon monoxide	*****
NO	nitric oxide	****
H_2O	water	****
CO_2	carbon dioxide	*****
N_2O	nitrous oxide	**
O_3	ozone	***
H_2S	hydrogen sulfide	**
COS	carbonyl sulfide	**
CS_2	carbon disulfide	**
CH_4	methane	*****
CD_4	deuterated methane	****
C_2H_6	ethane	*****
C_3H_8	propane	****
nC_4H_{10}	n-butane	****
iC_4H_{10}	isobutane	****
nC_5H_{12}	n-pentane	****
neo- C_5H_{12}	neopentane	****
C_2H_4	ethene	****
C_2H_2	acetylene	****
C_3H_6	propene	****

cC_3H_6	cyclopropane	****
CH_3OH	methanol	***
C_2H_5OH	ethanol	***
C_3H_7OH	isopropanol	***
$C_3H_8O_2$	methylal	**
$C_4H_{10}O_2$	DME	****
CF_4	tetrafluoromethane	*****
CHF_3	fluoroform	***
C_2F_6	hexafluoroethane	****
$C_2H_2F_4$	tetrafluoroethane	**
C_3F_8	octafluoropropane	***
SF_6	sulfur hexafluoride	***
BF_3	boron trifluoride	****
CF_3Br	bromotrifluoromethane	***
NH_3	ammonia	****
$N(CH_3)_3$	TMA	***
SiH_4	silane	****
GeH_4	germane	***

表 3.1: Mgaboltz 可模拟气体及其模型精度

STAR TPC 的工作气体选用的是 P10，即氩气和甲烷以 9:1 ($Ar:CH_4=9:1$) 的比例混合而成 [42]。P10 拥有着比较低的工作电压、良好的正比性和相对稳定的工作状态。以惰性气体 Ar 为主要的成分，对于最小电离粒子有着比较高的比电离，可参见表格 3.2，而且价格适中，所以对于大型的正比气体探测装置，Ar 作为主要的工作气体是一个良好的选择。其中以多原子分子气体甲烷 CH_4 作为猝灭气体，能够有效吸收 Ar 的跃迁光、减小二次激发的几率。另通过表 3.1 可以发现氩气和甲烷拥有者比较高的模型精度和模拟可靠性，可以用过 Garfield++ 来对 P10 进行一个比较详尽和可靠的模拟研究。

3.2.2 气体环境参数设置

该模拟中气体温度设定在 25° ，气压设定为高于标准大气压 2 mbar，气体设定比例格式为 90:10。对于气体探测器的模拟尤其是对增益比较关心的情况下，混合气体的潘宁效应不可忽略。当两种气体以一定的比例混合之后，主要

Symbol	Z	A	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	I/eV	W_i/eV	dE/x	$n_p/$ (i.p./cm)	$n_T/$ (i.p./cm)
H ₂	2	2	9.00×10^{-5}	15.2	37	4.11	5.2	9.2
He	2	4	1.78×10^{-4}	41.8	41.5	1.94	4.8	8.0
N ₂	14	28	1.25×10^{-3}	82	35	1.83	(10)	56
O ₂	16	32	1.43×10^{-3}	95	31	1.81	22	73
Ne	10	20.2	9.00×10^{-4}	137	36	1.73	12	39
Ar	18	39.9	1.78×10^{-3}	188	26	1.52	24.3	94
Kr	36	83.8	3.74×10^{-3}	352	24	1.36	(22)	192
Xe	54	131.3	5.89×10^{-3}	482	22	1.26	44	307
CO ₂	22	44	1.98×10^{-3}	85	33	1.83	35.5	91
CH ₄	10	16	7.17×10^{-4}	41.7	28	2.21	26.5	53
C ₄ H ₁₀	34	58	2.67×10^{-3}	48.3	23	2.25	84	195

表 3.2: 气体探测器中常用的几种气体的性质。I 为最小电离粒子在标准状态 (20°C, 760 Torr (1 Torr = 1.33×10^2 Pa)) 下的平均激发能量, dE/dx 单位为 MeV/gcm⁻², i.p. = ion pairs [43, 44, 45, 46]

成分的亚稳态能量略高于次要成分气体的电离能量而发生电离, 这种效应不考虑进来, 模拟的气体增益会偏低, 只有当潘宁系数以一定的值考虑进来之后才会得到比较精确的模拟值。而对于 P10 气体来说, 相关的潘宁效应原理和测量可参考 [47]。潘宁系数设定值为 0.21。对于多丝室的电场, 其电场强度一般可以达到 200 kV/cm 以上, 所以电场上限可设定为 250 kV/cm (具体需要参考丝室的结构和所加电压达到的电场计算值。) 由于 iTPC 的测试中并未引入强磁场, 所以该模拟中磁场的设定 $B = 0$ T。然后设定模拟精度, 生成气体表格, 根据气体表格数据可以得到气体的诸多性质, 具体的设置可参见附录代码块。

3.3 P10 气体基本性能模拟

高能带电粒子或者光子可以在其运动路径上电离探测器的工作气体, 电离产生的电子-离子对会在相应的探测条件下运动。理解工作气体中电子-离子对的运动过程, 是我们理解探测器工作和性能的关键。

3.3.1 电子-离子在P10中的漂移

3.3.1.1 电子在 P10 气体中的漂移

在 TPC 中，电子在气体中的漂移速度直接决定了对撞后产生的带电粒子到被丝室探测的时间，这一时间限制了电子学数据获取的频率，更重要的是限制了对撞机的工作频率。另由电子的漂移速度可以直接计算出电子的漂移距离，从而重建出带电粒子径迹在 TPC 纵向的位置，结合 TPC 丝室的径迹投影，从而重建对撞产生的带电粒子的三维径迹。最后，对于 iTPC 后期的测试也可提供更多的参考信息。电子因为质量很小，只有当外界电场可忽略的情况下，电子的漂移速度才是常数，当有外加电场时，电子的漂移速度可作为电场 E 的函数。J. Townsend 给出了一个电子漂移速度随电场 E 变化的公式 [48]：

$$W = \frac{e}{2m_e} \cdot E\tau \quad (3.1)$$

漂移速度的理论计算比较复杂，作为电场 E 的函数，漂移速度 W 可表示为 [49, 50]：

$$W(E) = -\frac{2}{3} \cdot \frac{eE}{m_e} \int \varepsilon \lambda(\varepsilon) \frac{\partial [F(\varepsilon)\mu^{-1}]}{\partial \varepsilon} d\varepsilon \quad (3.2)$$

式中， m_e 为电子质量， ε 为电子的能量， $\lambda(\varepsilon)$ 为电子与气体分子碰撞的平均自由程， $F(\varepsilon)$ 为电离电子的能量分布。因为碰撞过程中涉及到比较复杂的微观过程，很多函数难以估计。计算结果的精度一般不能满足气体选择的要求。Garfield++ 利用精确的实验数据和蒙特卡罗方法为我们提供了比较可靠的模拟方案，调用相关函数，我们可以方便地得到电子在混合气体中的漂移速度，由上一节的方法产生的气体表格文件，可直接获取电子在不同电场下的漂移速度(具体见下页代码块)。图 3.1 a 显示的是电子在 P10 气体中的漂移速度随电场强度的变化，可以看到相对较高的电场区域的漂移速度正比于漂移电场的强度。图 3.1 b 显示了低电场下，电子的漂移速度随电场强度的变化。由于电子波长随着速度的变化，使得电子与气体分子壳层的碰撞呈现出 Ramsauer 效应 [51]，所以电子在低电场下的漂移呈现出非线性的变化。另外电子在非常低的漂移电场下，其漂移速度随着外加电场的增加有一个很快的变化，可见漂移场强对电子漂移速度的影响是十分明显的。由第一章我们知道，STAR TPC 中的漂移电场为 135V/cm，由模拟结果得到漂移速度为：5.54cm/ μ s，与文献中的数值有个很好的吻合。

3.3.1.2 离子在 P10 中的漂移

一直以来困扰大型时间投影室的一个比较严重的问题就是丝端雪崩产生的阳离子回流导致的空间电场扭曲，从而导致电子漂移路径的扭曲以及空间电荷

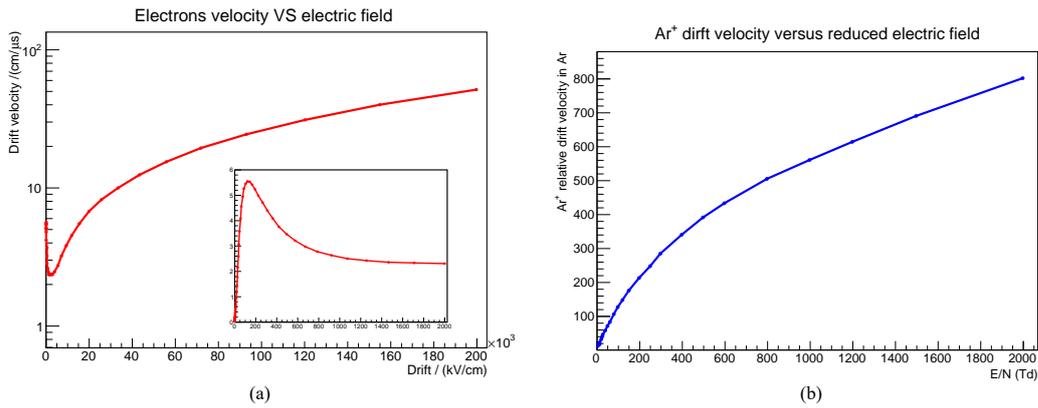


图 3.1: 电子漂移速度随漂移电场强度的变化

导致的增益下降等问题，使得丝室的性能变差。所以阳离子的漂移运动在GEM以及TPC类的气体探测器中是研究的重点。阳离子在没有外界电磁场的影响下作无规则的热运动，当有外界电场时，离子会在电场线的方向有一个定向的运动，这一定向运动的速度就是离子的漂移速度。相对电子来说，离子本身的质量较大，电场对离子漂移的影响并不是特别敏感，但依然在一个较大的电场范围内与约化电场 (E/p) 成一个线性关系:

$$W^+ = \mu^+(E/p) \quad (3.3)$$

式中 μ^+ 是离子的迁移率，在很大的一个电场范围内 μ^+ 的值相对变化很小。对于 Garfield++ 目前可以获得的阳离子迁移率随电场的变化的数据只有三种气体，分别是 Ne-Ne⁺，Ar-Ar⁺ 以及 CO₂-CO₂⁺。对于 P10 气体的模拟，可以直接调用 Ar-Ar⁺ 的数据。表 3.3 [41]展示了 Ar⁺ 随着约化电场的变化。

E/N (Td)	μ^+
0	1.53
8	1.53
10	1.53
12	1.53
15	1.52
20	1.51
25	1.49
30	1.47
40	1.44
50	1.41
60	1.38
80	1.32

100	1.27
120	1.22
150	1.16
200	1.06
250	0.99
300	0.95
400	0.85
500	0.78
600	0.72
800	0.63
1000	0.56
1200	0.51
1500	0.46
2000	0.40

表 3.3: 氩离子在氩气中的迁移率随约化电场的变化

约化电场单位 $1 \text{ Td} = 10^{-17} \text{ Vcm}^2$ 。E 为电场强度，N 为单位体积内气体分子数。由上表可以得到 Ar^+ 的相对漂移速度随着电场的变化曲线 3.1b。

3.3.2 电子-离子在P10中的扩散

3.3.2.1 电子在 P10 气体中的扩散

带电粒子产生的电子-离子由于热运动会在空间上产生随机扩散，对该扩散的研究可以帮助我们理解探测器内的物理过程以及对探测器位置分辨的影响的理解。在没有外界电场的影响下，电子-离子与气体发生频繁的碰撞，并很快地损失掉其能量，达到热力学平衡的状态。并遵从麦克斯韦的能量分布规律 [52]:

$$F(\epsilon) = C\sqrt{\epsilon}e^{-\frac{\epsilon}{kT}} \quad (3.4)$$

式中，k 为玻尔兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ 。假设不受外界条件如温度，压强和电磁场等的影响，由于热运动引起的电荷扩散的位置分布服从高斯分布:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4Dt}} \cdot x \quad (3.5)$$

式中， $\frac{dN}{N}$ 是经过时间 t 之后在距离远点 x 处单位元 dx 中发现电荷的量。D 表示扩散系数，对于线扩散和体扩散来说，该分布的标准差分别为

$$\sigma_x = \sqrt{2Dt}, \sigma_v = \sqrt{6Dt} \quad (3.6)$$

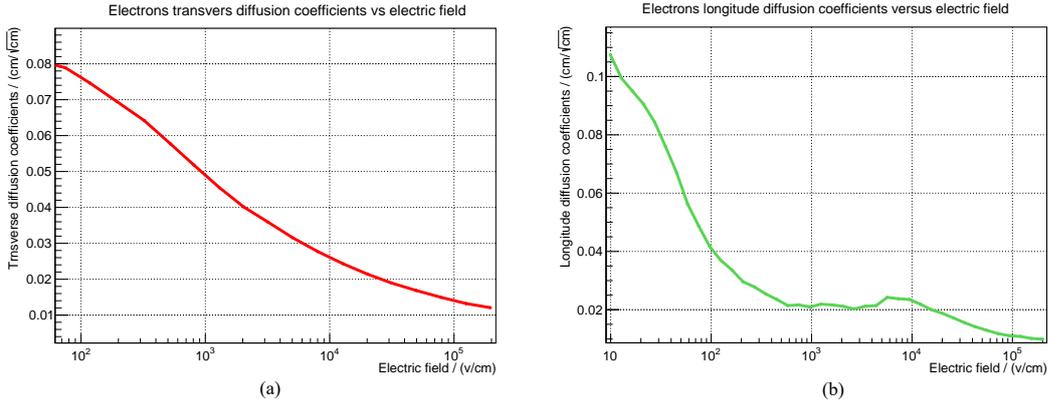


图 3.2: 电子在P10中的扩散系数随电场强度的变化

对于有漂移电场存在的情况，电子的扩散系数 D 可表示为：

$$D(E) = \int \frac{1}{3} \mu \lambda(\varepsilon) F(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3.7)$$

式中 μ 是当电子能量为 ε 时的瞬时速度，一般的 $\mu = \sqrt{2\varepsilon/m_e}$ 。同样地我们可以直接调用 Garfield++ 函数 *ElectronDiffusion()* 来获得相应气体环境下的电子扩散系数。在 Garfield++ 中横向和纵向的扩散系数的定义满足：

$$\begin{aligned} \sigma_T &= D_T \sqrt{d} \\ \sigma_L &= D_L \sqrt{d} \end{aligned} \quad (3.8)$$

式中 D_T 、 D_L 分别为横向(垂直于漂移径迹)和纵向(沿着速度方向)的扩散系数。 σ_T 、 σ_L 分别为横向和纵向扩散分布的标准差， d 为电子移动的平均距离。图

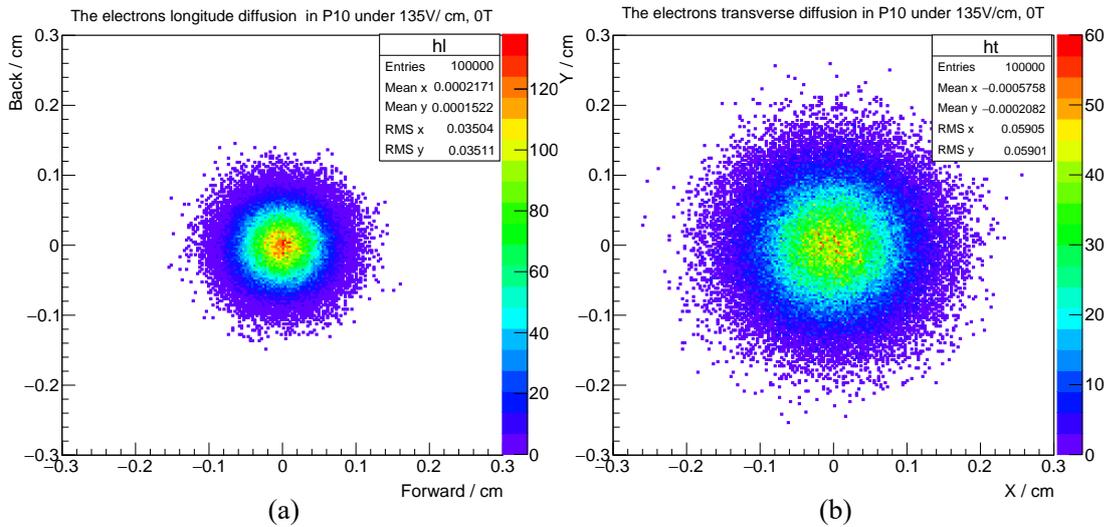


图 3.3: 电子在 P10 中 135V/cm, 0T 的条件下漂移 1cm 的扩散分布

3.2 显示的是电子在 P10 中不同的漂移电场下的纵向和横向的扩散系数。图 3.3 显示的是点在 P10 气体中，电场强度为 135V/cm，磁场强度为 0T 的条件下，漂移 1cm 的纵向和横向的扩散分布。可见，在这 1cm 的漂移中，电子群的横向扩散直径达到了 4mm。所以在没有强磁场约束条件下的性能测试中，应尽量使对信号有贡献的电子群漂移距离短一些，才能得到较为准确的增益及较好的能量分辨率。或者在测试中，不提供电子漂移场，使得丝室所测的信号只是发生阳极丝附近的部分，也能做到对原初电子的完整收集。

3.3.2.2 离子在 P10 气体中的扩散

对于离子热运动扩散，根据经典理论有：

$$D^+ = \frac{kT}{e} \mu^+ \quad (3.9)$$

对于电场下的离子的扩散，可将式 3.9 和式 3.3 代入 3.6，则有：

$$\sigma_x = \sqrt{2Dt} = \sqrt{\frac{2kTW^+pt}{eE}} = \sqrt{\frac{2kTpx}{eE}} \quad (3.10)$$

由此可知线性扩散与离子的本质和气体种类无关。

3.3.3 电子吸附系数

电子在运动的过程中会被气体分子吸附或者是被丝室室壁吸收，这种吸附的几率定义为吸附系数 [53]，在低电场条件下吸附系数对于惰性气体和氢气来说基本为零，但对负电性气体来说吸附效应非常明显。吸附效益会使得探测器的输出脉冲变小，而且对于大型的 TPC，电子的漂移路径比较长，对于远离丝室端的原初电离出的电子-离子对来说，其漂移过程中的吸附效应不得不考虑进来。设 h 为吸附系数， R 为工作气体中负电性气体的比例， λ 和 μ 分别为电子的平均碰撞自由程和瞬时速度， W_e 为电子的漂移速度。则单位时间内一个电子同负电性气体碰撞的次数为 $\mu R/\lambda$ ，则其理论吸附次数为 $h\mu R/\lambda$ 。假设电子吸附的平均时间为 T ，则有：

$$T = \frac{\lambda}{h\mu R} \quad (3.11)$$

则电子的平均吸附自由程为：

$$\lambda_c = W_e \cdot T \quad (3.12)$$

另平均碰撞自由程 λ 是电子能量的函数，有 $\lambda(\varepsilon) = \frac{1}{N\sigma(\varepsilon)}$ (其中 $\sigma(\varepsilon)$ 为该气体的 Ramsauer 截面， N 为单位体积内的分子数)。其中瞬时速度 $\mu = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{m_e}}$ ，可得：

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{m_e}{2\varepsilon}} \frac{W_e}{NhR\sigma(\varepsilon)} \quad (3.13)$$

电子在漂移距离 x 后损失量有:

$$\frac{n}{n_0} = e^{-\frac{x}{\lambda_c}} \quad (3.14)$$

同样的由 Garfield++ 我们可以得到在特定漂移电场和气体组分下, 电子的吸附系数。根据负电性气体(对于探测器来说通常可能混入负电性气体比如空气)的

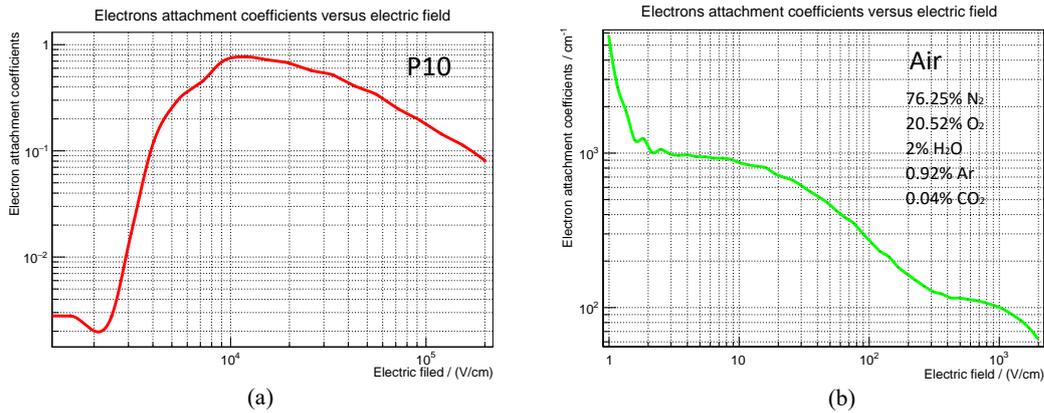


图 3.4: a 电子在P10中的吸附系数随电场强度的变化; b 电子空气中的吸附系数随漂移电场的变化

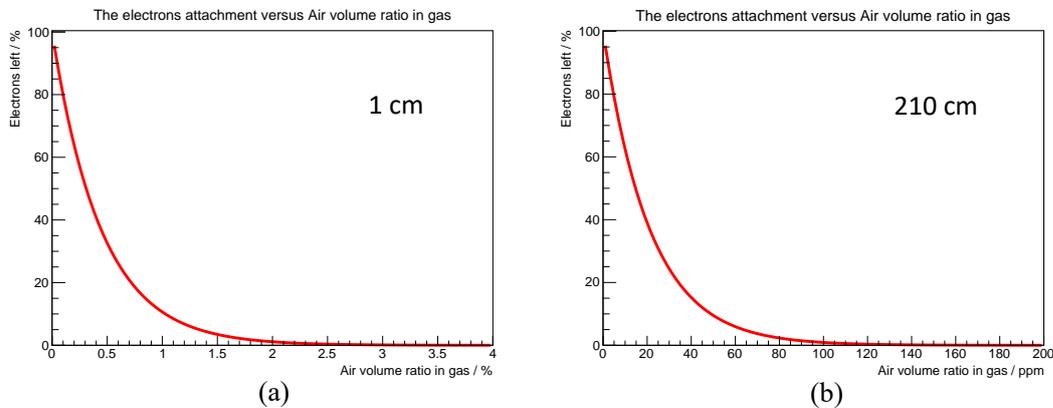


图 3.5: 电子团漂移 1cm 和 210cm 后剩余电子数量百分比随混入空气比例的变化

比例和吸附系数以及我们对电子损失量的要求, 可以为我们提供气体纯度的参考值。在 Garfield++ 中, 吸附系数定义为平均吸附自由程的倒数:

$$h_{Garfield} = \frac{1}{\lambda_c} \quad (3.15)$$

图 3.4 显示的是电子在 P10 气体中的吸附系数随漂移电场强度的变化。漂移电场为 135V/cm 时, P10 对电子的吸附系数为 0, 而在空气中系数系数则为

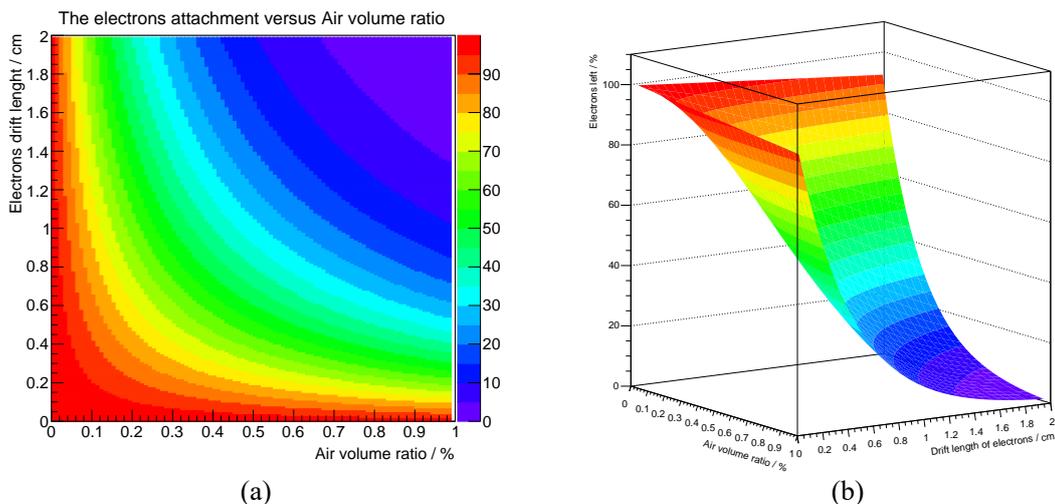


图 3.6: 剩余电子数量百分比随电子漂移距离与空气比例的变化关系

224.1. 假设 P10 中有 1% 的空气污染，则由式子 3.14 可得电子群在经过 1cm 的漂移后，剩余的电子个数与原初电子个数之比为：

$$\frac{n}{n_0} = e^{-\frac{lr}{\lambda c}} = e^{-\frac{1}{100\lambda c}} = e^{-\frac{h_{Garfield}}{100}} = 0.1063 \quad (3.16)$$

式中， l 为电子的漂移距离， r 为混入空气比例。由计算结果可知原初电子损失掉了将近 90%，图 3.5 显示的是空气比例与剩余电子百分比的关系，因为 STAR TPC 中电离电子最大的漂移距离为 2.1m，所以计算了在此漂移距离下混入空气比例对电子损失的贡献。由方程 3.16 可知电子损失函数是电子漂移距离和空气百分比的函数，图 3.6 显示了剩余电子数量百分比随电子漂移距离和空气比例的变化关系。

3.3.4 汤森系数

在电场强度达到 kV/cm 量级的时候，使得电子可以获得足够多的能量，使得电子与气体分子之间足以产生非弹性碰撞，当电子的能量增加到超过气体的第一电离位时，就会电离出新的电子-离子对。设 λ 为电子电离出一个电子-离子对需走的平均路程，即平均电离自由程。 λ 的倒数 α 称为汤森系数 [54]，即电子在单位距离内电离出的电子-离子对数。电离出的电子-离子对数随着电子的运动不断的增加，形成雪崩。我们假定在一个均匀的强电场区有个自由电子释放出来，在一个平均电离自由程之后，有一个电子-离子对产生，在不考虑微观时间和位置的效应下，随后将有两个电子继续漂移，在随后的一个平均电离自由程之后会产生另两个电子-离子对，这样就有 4 个电子继续漂移，如此倍增下去。假设 n 为在位置 x 处的的电子数，在经过路程 dx 后，增加的电子数

目的是：

$$dn = n\alpha dx \quad (3.17)$$

积分后得：

$$n = n_0 e^{\alpha x}, M = \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x} \quad (3.18)$$

其中 n_0 为原初的电子数， M 为倍增因子或者是增益。值得注意的是，汤森系数不仅跟气体的性质有关，更是电场的函数，对丝室来说 α 便与电子相对丝的位置 x 有关，则对于 M 则有：

$$M = \exp\left[\int_{x_1}^{x_2} \alpha(x) dx\right] \quad (3.19)$$

文献 [55] 给出了一个对低 α 值随电场变化的近似式。我们利用 Garfield++ 的

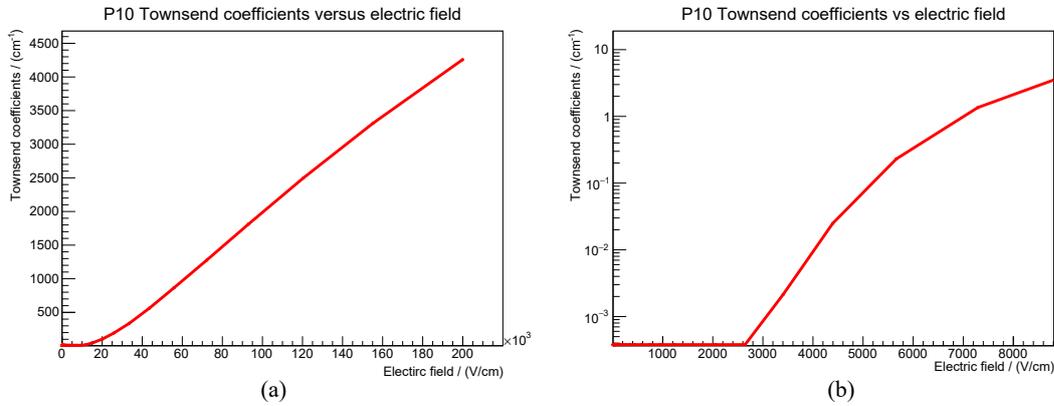


图 3.7: P10汤森系数随电场的变化

精确的模拟模型，同样可以得到在不同的电场下的汤森系数。结合丝室电场与空间坐标的位置关系，可以得到丝室内汤森系数 α 随坐标变化的关系 $\alpha(x)$ ，这样利用式子 3.25 得到一个计算增益值。图 3.7a 显示了不同电场区间下的汤森系数，可见汤森系数在比较大的电场范围内呈现一个线性增加的状态。3.7b 显示了在低电场条件下的 P10 汤森系数的变化，在电场达到 2600V/cm 时电离效应开始出现。综合以上的模拟，不管对与 TPC 内电子的漂移，还是多丝室内电子的雪崩放大，结合我们需要的性能，可以为我们提供漂移场，多丝室丝端电压以及磁场等值有价值的参考数据。对 TPC 来说，电子漂移尽量要快，漂移电场又不能使漂移电子发生次级电离；对于负电性气体的影响，我们应该控制其探测器内比例不超过我们的性能要求值；漂移电子横向扩散 σ_x 尽量小，多丝室位置分辨尽量好；多丝室尽量能够工作在电压相对较低，增益又相对合适的区间。因之后 iTPC 的测试并没有涉及到对撞机内的束流测试，该模拟旨在针对之后测试中物理和性能的相关问题理解，所以气体环境设置并没有引入磁场，如果得到更加贴合 STAR TPC 内的电子-离子运动模式，需要考虑到磁场对各参数的影响。

3.4 放射源及丝室空间布局

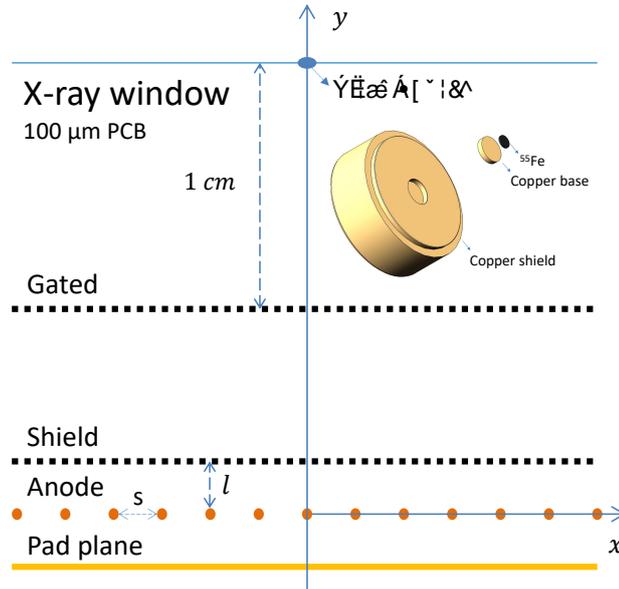


图 3.8: 放射源及丝室空间布局

对于 STAR TPC 来说，粒子鉴别是其核心性能，在第一章我们提到，粒子鉴别需要我们获得粒子的能损 dE/dx ，这样对探测器的增益及其均匀性的测试就尤为重要。对探测器增益的测试，需要我们已知原初电离的电子个数。这样就需要一个能量比较确定的射线源。对于 TPC 来说，因为激光有非常好的单色性，所以每次对丝室增益的测试和标定都是用其特有的激光系统来完成。另外探测器测试实验中用的相对较多的就是 ^{55}Fe 放射源，其特征射线有着比较确定的能量，可以用来进行精确的增益测试。该模拟及后期的测试都是使用的 ^{55}Fe 来进行的。测试所购置的 ^{55}Fe 放射源是一面源，被涂刷在铜基座上，放射源直径为 5mm，铜基座直径为 1cm。如图 3.8 所示，其显示的是多丝室及测试箱的横截面图。最下端是 iTPC sector 的读出板 Pad Plane，往上依次是阳极丝-Anode，阴极丝-Shield，门极丝-Gated 和 X 射线窗。右上角显示的放射源及其基座以及防护罩的 3 维爆炸示意图。其中 s 是阳极丝间距为 4mm，阳极丝到阴极丝和读出板的距离为 $l = 2\text{mm}$ ，阴极丝到门极丝的距离为 6mm。X 射线窗可选用材料为 $100\ \mu\text{m}$ PCB。门极丝到 X 射线窗的距离为 1cm。

3.5 ^{55}Fe X 射线在 P10 中的传输及能损模拟

3.5.1 ^{55}Fe X 射线与 Ar 原子壳层的相互作用

对于 X 射线来说，其对气体的电离主要是射线与与气体原子壳层的光

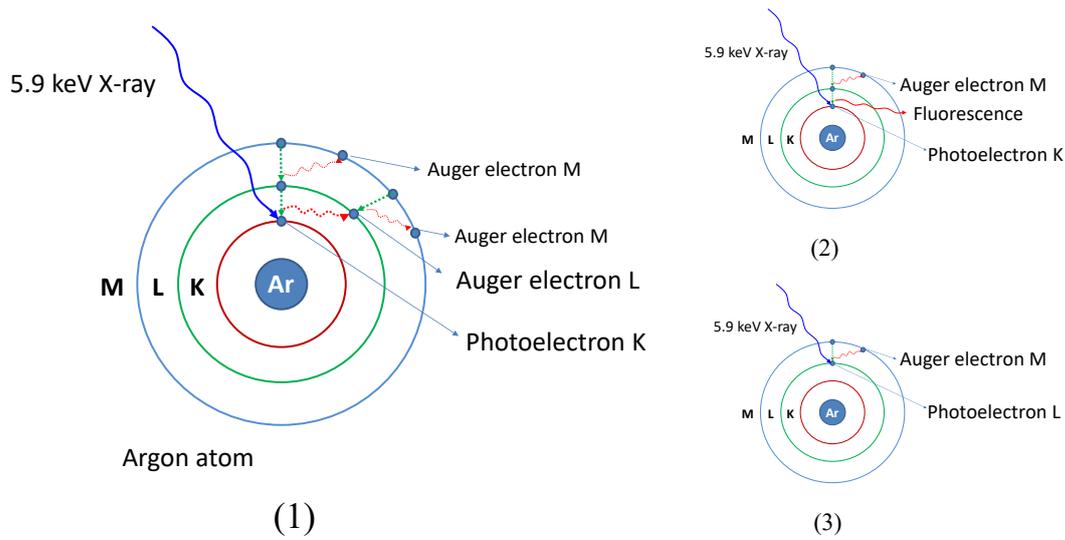


图 3.9: 5.9keV X 射线与原子壳层的反应模式

电吸收过程。光电效应或者光电吸收是涉及到气体原子多个能级的量子过程 [56, 57, 58]。由于动量守恒的要求，光电吸收不会发生在光子和自由电子上，对于一个多壳层或多能级的气体原子来说，光电吸收过程更容易发生在内壳层上。对⁵⁵Fe 来说，其通过电子捕获进行衰变，半衰期为 2.744 年，衰变可以产生 γ 、X 和 β 射线，其中以 5.9keV 能量的 X 射线为主。对于氩原子，其主要有 3 个壳层，分别是壳层 M、L、K。各能级的结合能分别为： $E_M = 0.02\text{keV}$ ， $E_L = 0.287\text{keV}$ ， $E_K = 3.2\text{keV}$ 。图 3.9 显示的 5.9keV X 射线与氩原子壳层的反应过程示意图，对于该能量下的 X 射线，其易于电离内壳层 K 层的电子，且电离过程涉及到复杂的跃迁机制，主要以两种模式为主：一是射线将 K 层电子电离，该电子的能量为 $5.9 - E_k = 2.7\text{keV}$ ，随后 L 层电子跃迁至 K 层，并释放出能量为 $E_k - E_l = 2.91\text{keV}$ 的光子，该光子将 L 层上的电子电离，形成能量为 $2.91 - E_L = 2.62\text{keV}$ 俄歇电子，随后同样的过程发生在 L 层和 M 层之间，产生 2 个 M 层的俄歇电子；二是射线将 L 层电子电离，L 层电子跃迁至 K 层上，并释放出 2.91keV 特征光子。还有一种比例比较低的模式，就是射线电离 L 层的电子，并发射出能量为 5.61keV 的光电子。

3.5.2 ⁵⁵Fe X 射线在 P10 气体中的衰减

射线在介质中一般呈指数形式地衰减，研究射线在气体中的衰减是我们理解其在气体中被吸收和传播的关键，比如射线在气体中被吸收的空间分布决定了丝端信号事例数的差异。具体来说，由图 3.8 可以看到，放射源是一个直径为 0.5 mm 的面源，其向外发射的 X 射线覆盖一定的角度和空间范围，这也就意味着，其可以在多根丝上产生信号。理论上 X 射线的强度衰减与其在物质中

经过的距离成正比。假设入射的 X 射线强度为 I_0 ，射入 P10 中，在 x 处的强度为 I_x ，经过 dx 后其强度衰减量为 dI ，则有 [59]：

$$-dI = I_x \mu dx \quad (3.20)$$

积分后得

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.21)$$

式中 I_0 为初始射线强度， μ 为衰减系数，对不同的射线和介质来说，衰减系数不尽相同。美国国家标准技术研究所 NIST 的官方网站上可以查到不同能量的射线在部分物质中的衰减系数。Garfield++ 的 Heed 同样为我们提供了光子吸

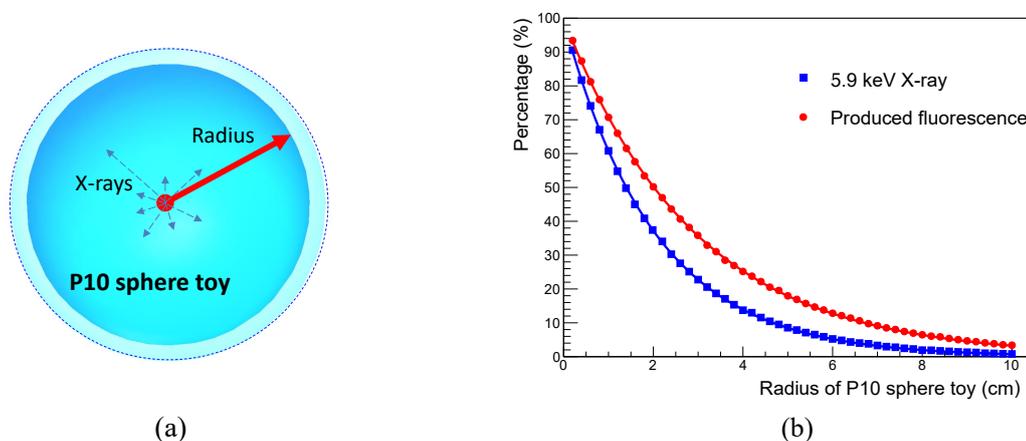


图 3.10: a X 射线吸收衰减模拟设置示意图；b 为 5.9keV 和荧光 X 射线随气体厚度的衰减

收的模拟方案。对于 5.9keV 的 X 射线在 P10 气体的传播和衰减，可以利用其特有的光子吸收函数来模拟。在模拟中设定吸收介质，吸收介质的几何形状，射线的能量以及射线的发射方向。为了易于模拟和理解，此次模拟将气体几何形状设定为球形，射线方向设定为随机。气体球半径从 0.2 cm 逐渐增加到 10 cm，每个半径下实验光子数为 10 万个，保证模拟的统计性，由光子输送函数 $TransportPhoton()$ 可以得到每个半径下的衰减百分比。设投入的总的光子数量为 N ，吸收的光子数量为 N_{ab} ，则有剩余的或者逃逸的光子百分比为：

$$P_{esc} = 1 - N_{ab}/N; \quad (3.22)$$

具体的模拟操作方法可参见附录代码块，由此得到射线强度随气体厚度的衰减曲线，从而得到其衰减系数。图 3.10a 显示的是气体球及射线的模拟设置示意图，图 3.10b 是由模拟结果得到的 5.9keV 能量的光子和 2.91keV 逃逸光在 P10

中的衰减曲线。由射线衰减的理论函数拟合得到的 5.9keV X 射线在 P10 中的衰减曲线 [59]为:

$$I = I_0 e^{-0.4927x} \quad (3.23)$$

其衰减系数为: 0.4927, 衰减长度 $l = \frac{1}{\mu} = 2.03$ cm。逃逸光的衰减曲线为:

$$I = I_0 e^{-0.3423x} \quad (3.24)$$

其衰减系数为: 0.3423, 衰减长度为 2.92 cm。

3.6 δ 电子在P10中的传输及能损模拟

由上一节我们了解到 P10 与氩气的原子壳层电子发生光电吸收, 电离出能量相对较高的 δ 电子。由表格 3.2 我们了解到, Ar 的电离能为 26eV, CH₄ 的电离能为 28ev。所以对于 P10 气体来说, 其等效的电离能为:

$$W_i = 0.9W_{Ar} + 0.1W_{CH_4} = 26.2eV \quad (3.25)$$

由于光电效应发射的 δ 电子能量远大于 P10 气体的等效电离能, 所以该电子会继续电离 P10 气体。由于 δ 电子的平均自由电离程很短, 其能量会在很短的距离内耗尽, 所以对于俄歇电子的产生模式, 其在气体中产生的次级电子数最多, 最接近于入射光子能量, 该种模式电离产生的电子数分布也称全能峰。假设 ⁵⁵Fe X 射线的总能量全部转化为了 δ 电子的能量, 那么产生的次级电子-离子对数为:

$$N_{main} = E_x/W_i = 5900/26.2 = 225.2 \quad (3.26)$$

式中, E_x 为入射 X 光的能量。但实际中, 由于结合能及多种电离模式的存在, 该射线的能量并不会完全转化为 δ 电子的能量, 其产生的次级电子的数量会小于 225。相应的由于跃迁过程中发射的 2.91keV 的荧光光子可能并没有继续电离 P10 气体, 而是逃逸出了气体球, 该过程产生的次级电子数只来源于 2.7keV 的 K 层的光电子, 其产生的电子数应:

$$N_{esc} = E_\delta/W_i = 2700/26.2 = 103 \quad (3.27)$$

式中, E_{delta} 为 K 层光电子的能量。该种模式下产生的电子数分布称为逃逸峰。同样的 Garfield++ 的光子吸收的模拟默认开启了 δ 的电子传播和吸收的模拟功能, 通过该函数可以得到射线电离出的总的电子-离子对数 ne 的分布, 如图 3.11。对得到的电子数分布进行高斯拟合, 得到全能峰的峰为在 222.1 个电子处, 而逃逸峰在 102.8 个电子处, 模拟结果比较符合预期。两峰的峰位比为 2.16。值得注意的是, 由于模拟过程的限制, 该模拟过程中逃逸峰与全能峰事

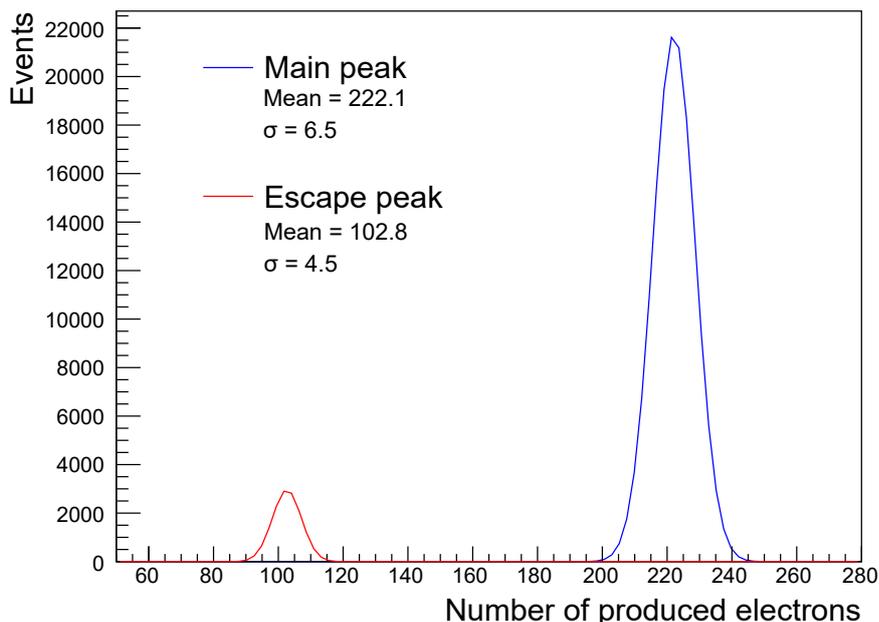


图 3.11: 射线电离出的电子数分布

例数比例与实际探测器探测得到的两峰比例不同。对于该模拟，如果气体球的半径足够大，逃逸峰则会消失，这是因为气体太厚，逃逸光也不能逃逸出气体之外，所有的能量都沉积在了气体球内。而对实际情况来说，即使气体足够厚，也不会出现逃逸峰消失的情况，因为逃逸光相对 K 层光电子的衰减长度要大的多，其发生二次电离的位置不同，而对丝室来说，不同位置的电离因信号发生时间和阳极丝空间分布的影响，会产生两个完全独立的信号，所以还是会有逃逸峰的存在。而且逃逸光电离出的电子数量：

$$\begin{aligned}
 N_{esc2} &= (E_{fluo} - E_L)/W_i = (2910 - 287)/26.2 = 100.1 \\
 N_{esc3} &= (E_{fluo} - E_M)/W_i = (2910 - 20)/26.2 = 110.3
 \end{aligned}
 \tag{3.28}$$

式中， E_{fluo} 为荧光或者逃逸光的能量。所以真实情况下两峰的峰位比要介于 2.0~2.2 之间。对于光子吸收或者 δ 电子产生的空间分布，可以通过函数 $GetElectron()$ 得到。图 3.12a 显示的 5.9keV 光子在气体球中吸收点的空间分布，图 3.12b 显示的 2.91keV 荧光吸收的空间分布。由图可以看出，5.9keV 光子的衰减相对荧光来说要快一些。对于 δ 电子来说，其电离产生的所有的次级电子的位置，也都可以由该函数得到。图 3.12c 显示的 5.9keV 射线电离出的 2 个 δ 电子的运动路径图，坐标原点代表光子吸收点，随着电子的运动，其距离坐标原点越远，颜色越红，每个数据点代表次级电离产生点。图 3.12d 为这 2 个 δ 电子的传输长度分布，已知两电子的能量比较接近，所以该分布近似一致。由右图可以看出，2 个 δ 电子的平均传输长度为 $165\mu m$ 。

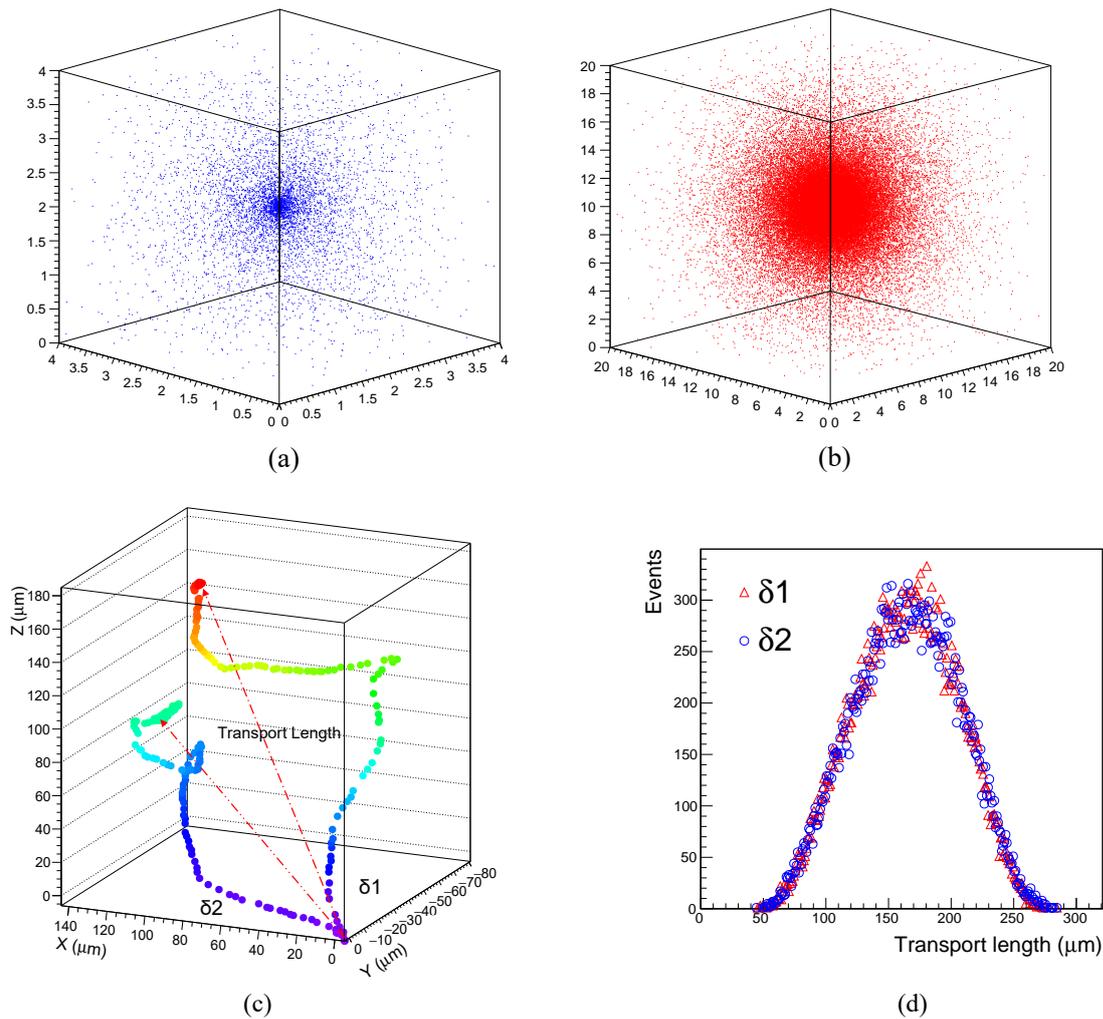


图 3.12: a 和 b 为光子吸收的空间分布,其中点的坐标为吸收点的空间位置,单位为 cm; c 和 d 为 X 射线电离产生的两个 δ 电子的传输路径和传输长度分布

3.7 5.9keV X 光吸收空间分布

由放射源及丝室的几何结构, 设定 X 射线的入射角度以及气体环境的几何结构, 利用上一节的方法即可得到丝室内光子的吸收点或者是电离位置的空间分布。3.13 上图显示的是 iTPC 多丝室测试箱 X 光电离位置横截面图, 3.13 下图显示的测试箱内 X 光电离位置的俯视图。已知多丝室阳极丝的间距为 4 mm, 则可以看出 X 射线电离点能够覆盖的范围大约为 40 根阳极丝的宽度, 同时这也被之后的测试所验证。值得注意的是电离点在中心处的统计量相对其他位置是非常高的, 这就造成了电离点或者信号强度分布不均匀的情况, 针对此情况多带来的一些效应, 会在后面有所讨论。

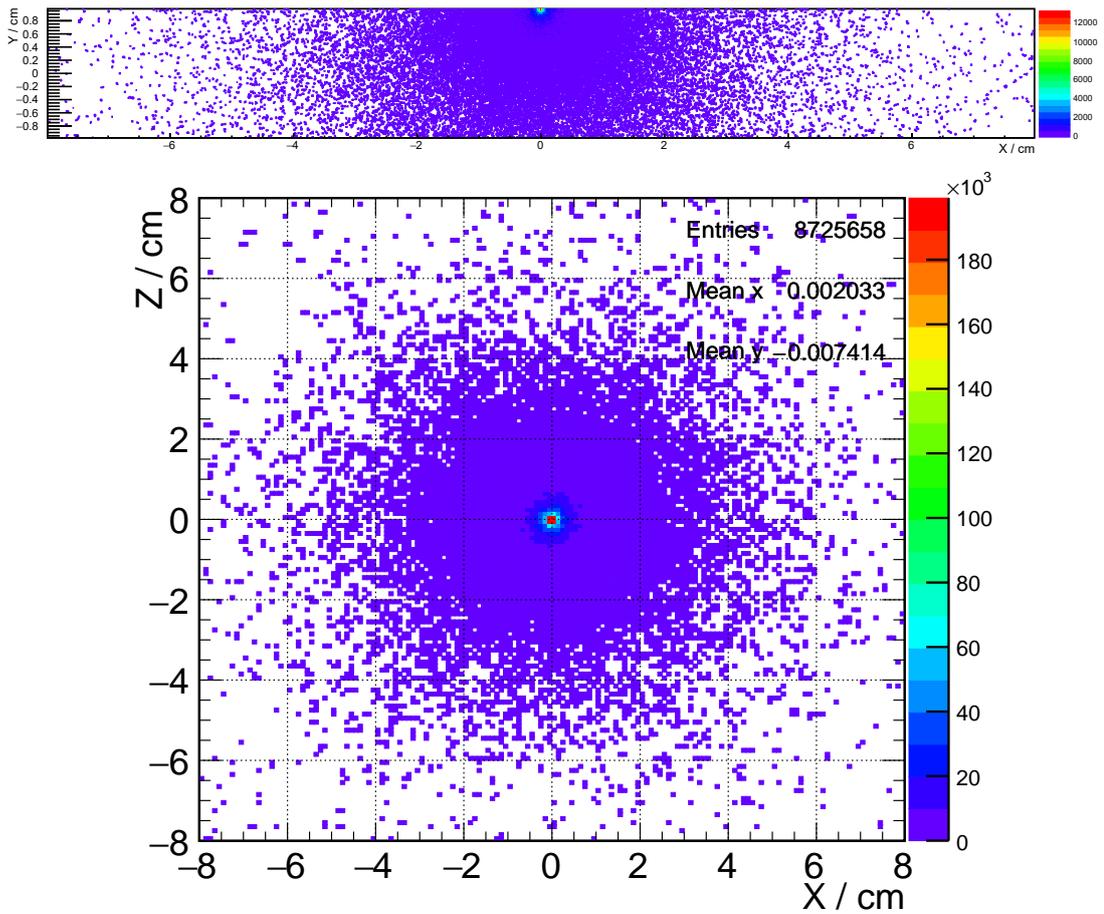


图 3.13: 上图为 iTPC 多丝室测试箱内 X 光电离位置侧视图；下图为 iTPC 多丝室测试箱内 X 光电离位置的空间俯视图

3.8 丝室电场模拟

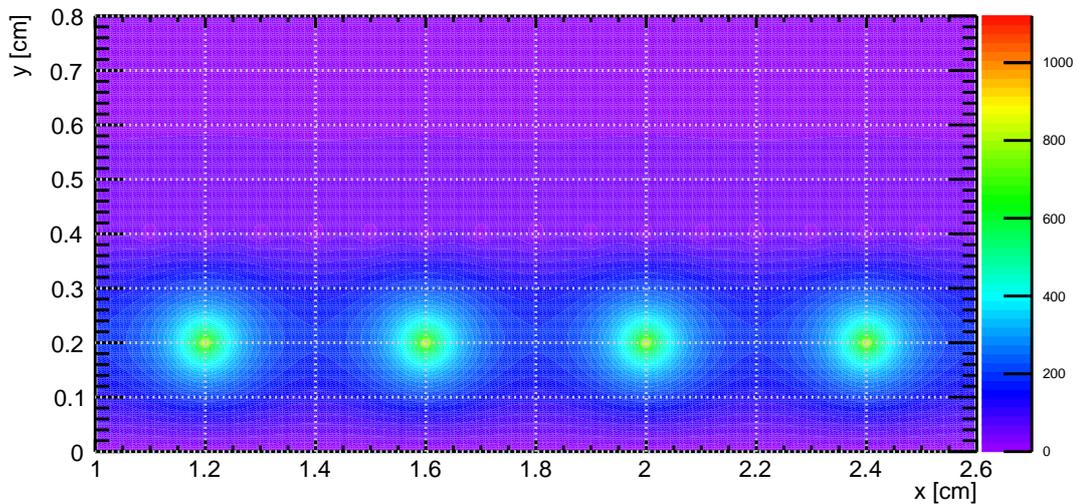


图 3.14: 丝室电场空间分布

探测器电场的模拟计算是增益模拟的关键和基础，电场强度的空间分布直接决定了电子电离的过程，也就决定了增益的大小和精度。由第一章我们已经知道，多丝室内的电场随与丝的几何尺寸，丝室内的空间布局以及丝端电压相关，并且给出了相应的电场计算的理论公式。针对一般的丝室布局 Garfield++ 可以计算其内的空间电场分布，其一般步骤为：1，定义丝室内的元素如丝、读出板及其直径、数量、几何布局、所加电压；2，定义几何布局视觉化对象；3，定义传感器，添加丝室布局；4，定义电场视觉化对象。对于 iTC 来说，其阳极丝丝端电压设为 1120V，阴极丝、门极丝以及读出板电压均设为 0。其他几何构造与 iTPC 及测试箱的构造相同。为了简化、优化模拟及视觉化效果，丝的数量不用太多，尺寸不用太大。视觉化区域也尽量要小。图 3.14 显示的 iTPC 及其测试箱内的电场几何分布。如果想得到每一空间位置的具体数值，可直接调用函数 *Sensor* 类函数 *ElectricField()*。

3.9 电子运动径迹视觉化



图 3.15: X 射线电离出的电子在丝室电场下的漂移径迹视觉化

前面提到了因为放射源的几何构造，和 X 光发射角度的问题，其电离点会覆盖多根丝。并因 X 射线本身在丝室内的衰减规律，丝端的信号频率呈现出不均匀性。我们同样可以利用 Garfield++ 来视觉化丝端信号空间分布的情况。X 光电离出的电子会沿着丝室内的电场线运动，利用 *ViewDrift* 类和蒙卡雪崩类 *AvalancheMC* 可以实现对电子运动径迹的模拟(参加下页代码块)。图 3.15 显示

的来自放射源发射的 ^{55}Fe X 光电离出的电子在丝室内的漂移运动视觉图，可见虽然视图区域只包含了 5 根阳极丝，但仍能清楚地看到电子在不同丝上的数量分布的不均性。该不均性会对丝的增益分布造成一定的影响，会在后面的测试中讨论相关的问题。除了蒙卡雪崩类之外，还有一个 *DriftLineRKF* 类可以结合 *ViewDrift* 使用，该类为纯计算类，电子径迹理想化，对径迹的几何走向要求比较高，该类计算得到的径迹几何走向与丝室内的空间布局不能有冲突。比如该类计算得到的电子径迹走向了丝，此时程序默认该条径迹为非法径迹，程序便会停止径迹计算及模拟。

3.10 电子雪崩及气体增益模拟

电子雪崩过程是我们得到气体增益的基础，对于 TPC 内的丝室来说，增益及其均匀性是其鉴别粒子的关键。所以对丝室的增益测试，如有一个比较好的理论和模拟计算对照是非常关键和有必要的。Garfield++ 为我们提供了丝室内电子雪崩的完整方案。利用类 *AvalancheMicroscopic* 及其相关函数可以在任意位置投放电子并获得电子运动及电离雪崩的径迹、雪崩产生的次级电子-离子对数，从而获得该电子在此次模拟下的增益。图 3.16a 显示的是 10 个电子在丝室内漂移雪崩图。本底颜色代表电场强度分布。径迹上的点代表电子电离次级电子-离子点，颜色越深表示次级电子的能量越高，越接近于丝表面，次级电子的数量和能量越高。对强电场下的单电子雪崩增益服从 Polya 分布 [60, 61, 62]

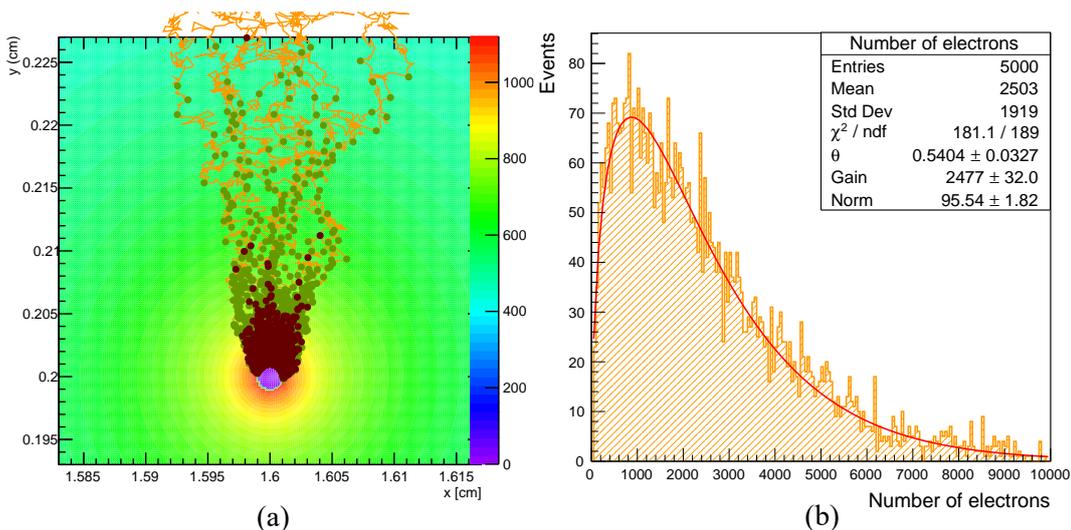


图 3.16: a 为丝室电子漂移电离雪崩图；b 为 1120V 阳极电压下，5000 电子在 P10 气体中雪崩产生的电子数分布

或负二项分布，设每次雪崩产生的电子数为 G ，多次模拟的结果的均值为 \bar{G} ，

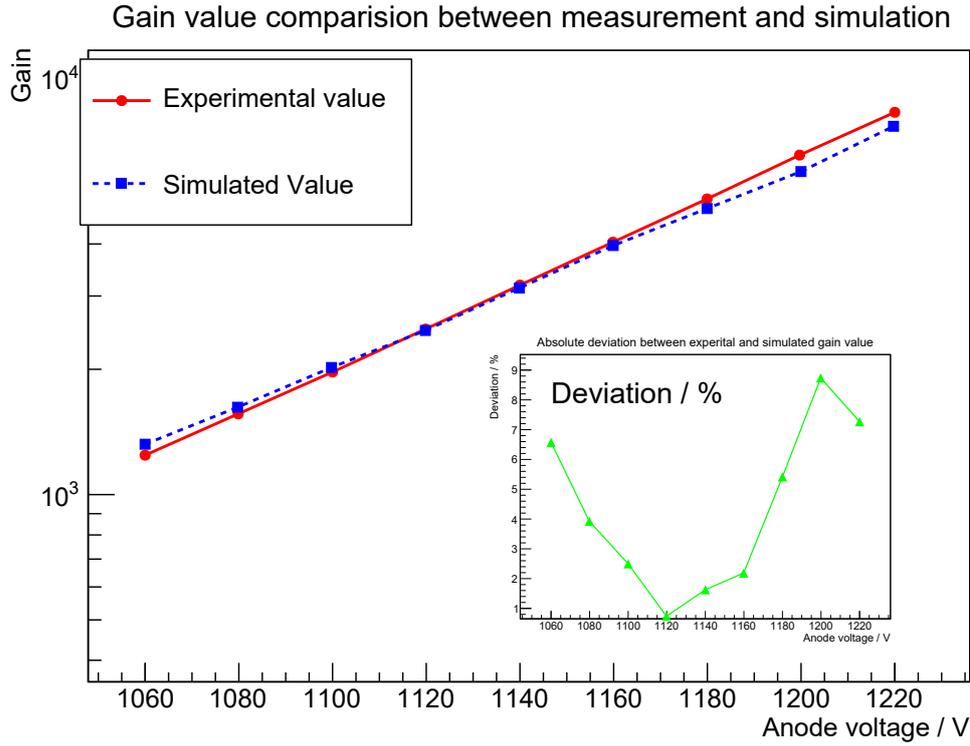


图 3.17: c 为增益模拟电压扫描。

即 $Gain = \bar{G}$ 。且对 G 和 \bar{G} 有：

$$F_{polya}(\bar{G}, \theta) = \frac{(\theta + 1)^{\theta+1}}{\Gamma(\theta + 1)} \left(\frac{G}{\bar{G}}\right)^{\theta} \exp\left(-(\theta + 1)\left(\frac{G}{\bar{G}}\right)\right) \quad (3.29)$$

其中标准差 σ 与增益 \bar{G} 以及参数 θ 满足关系：

$$f = \left(\frac{\sigma}{\bar{G}}\right)^2 = \frac{1}{1 + \theta} \quad (3.30)$$

图 3.16b 显示的是在阳极电压 1120 下电子雪崩增益分布，拟合函数为上式的 Polya 分布，其中 $Gain = \bar{G} = 2477 \pm 32.0$ ，而后期的实验在 1120 的增益为 2424，可见模拟结果与实验测量值在该电压下非常接近。同样地对其他阳极电压下的增益也进行了一个模拟，电压模拟区间为 1060~2020V。图 3.17 显示的是各电压下的模拟值与实验测量值的一个比较，可见 Garfield++ 在很大的一个电压范围内，其与实验值符合较好，最大偏差不超过 9%。

3.11 小结

本章主要介绍了如何利用 Garfield++ 来模拟和计算多丝室测试所涉及的相关物理和性能。主要有：测试使用的 P10 气体，文章介绍了如何利用

Garfield++ 的 Magboltz 类实现对 P10 气体的基本性质如电子的漂移速度、电子扩散、电子的粘滞系数随着外加电场变化的模拟和计算；测试丝室的增益使用的是 ^{55}Fe 放射源，可以释放 5.9keV 的 X 射线，利用 Garfield++ 的 Heed 类对 X 光在 P10 中的衰减和能损分布做了模拟；同样利用 Heed 类模拟了 X 光电离出的 δ 电子在 P10 中的能损和扩散；根据测试箱的几何分布，模拟了 X 光在整个多丝室丝面的电离点的几何分布；利用其电场和雪崩类模拟了丝室的电场分布以及在不同电压下的丝室增益分布，发现后期的实验数据符合得较好。

第四章 iTPC 多丝室测试系统搭建

对于 iTPC 多丝室的来说，因其用于 STAR TPC 内的带电粒子径迹重建及粒子鉴别，所以对它的测试着重的是探测器的增益及其在整个丝面上的均匀性。那么对于该测试系统来说，最好的办法就是利用已知能量的 X 射线来完成丝室增益及其均匀性的测试。所以系统搭建的方向也就是利用 X 射线对丝室进行相关性能的扫描，又因为 iTPC 作为一典型的气体探测器，其性能与相关的工作气体及其状态也是密不可分的。本章主要介绍的就是如何利用相关设备及装置实现 iTPC 多丝室测试系统的功能需求、如何实现系统集成及其自动化。

4.1 测试方案设计

在进行测试系统搭建之前，首先明确的是测试过程中需要测试的量，有哪些工具或者是电子学可以用来测试这些量，另外针对测试 iTPC 丝室特有的尺寸和结构，需要实现设计好相关的测试硬件。比如因为 iTPC 多丝室是典型的气体粒子探测器，所以针对该探测器的测试，首先需要有一个密封性良好的气体环境，这样就需要一个气体测试箱。测试气体用的是 P10 即甲烷和氩气的混合气体，这就需要一个精度相对较高的气体混合及流通系统。因为测试探测器的增益，所以需要能量较为单一和确定的射线源。射线源因其特有的危险性，所以需要相应的防护设施。因为气体状态对丝室的增益有比较大的影响，所以在测试过程中需要对测试气体的状态有一个良好的监控，自然需要气体状态的监控系统。又因为丝室增益是其测试的重点，所以测试主要针对的是阳极丝上的信号，因其工作电压相对较低，信号脉冲在 μV 级别，所以需要特定的信号放大器以及相应的 ADC。最后因为多丝室有 160 根阳极丝，前后尺寸跨度较大，放射源射线不能全部覆盖所有的阳极丝，则需要射线扫描系统。针对这些，所用的电子设备及功能主要有：示波器用来查看阳极信号、温度压力传感器用来监控记录 P10 气体的状态、电荷灵敏放大器用于丝端信号的积分、放大和成形、多道分析器 MCA 用来将积分成形信号数字化，二维步进系统用来移动和定位放射源，最后控制台用来存储和分析试验数据。

功能需求	性能要求	解决方案
气体环境	强度高，密封良好	合金、硅胶测试箱
测试用气体	正比性好，纯度高	90% Ar + 10% CH ₄
气体混合	混合精度高，稳定性好	莱峰混气仪

气体监控	误差 $<1^{\circ}\text{C}$, 1mbar	BMP180 BOSCH 模块
射线源	能量单一(Gain); 强度高	^{55}Fe , X-ray Tube
放射源移动与定位	横向 $>80\text{cm}$, 纵向 $>70\text{cm}$	二维步进系统
信号查看	采样率高, 特征阻抗 50Ω	Tektronix MDO4054B-3
信号发生	线性好, 特征阻抗 50Ω	Tektronix AFG3152C
脉冲积分、成形	成形时间适中, 积分相对完整	AMP-TEK A225
电压放大	放大稳定, 无外干扰和噪音	AMP-TEK A206
脉冲数字化	通道多, 精度高, 频率快	AMP-TEK MCA8000D
数据存储	-	Work Station

表 4.1: 测试所需元素、性能要求及相应解决方案

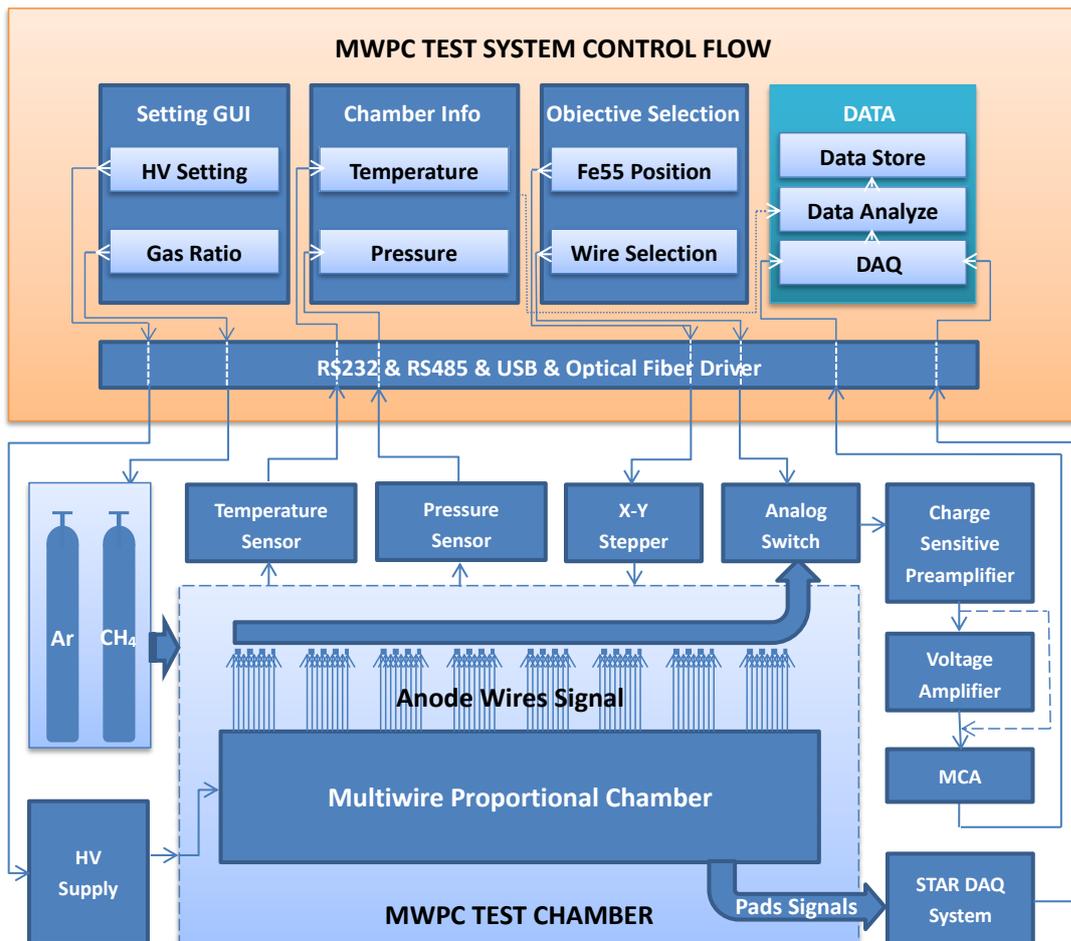


图 4.1: 多丝室自动化测试系统控制逻辑框架

设计考虑因素及相关解决方案总结在表 4.1 中, 相应的测试流程可以视觉

化为如图 4.1。

4.2 组件设计制作及准备

4.2.1 iTPC 多丝室测试箱

首先是测试箱的设计，测试箱除了要保证有足够的强度能够容纳支撑 iTPC 探测器之外，还因为考虑到外界空气等负电性气体对丝室增益的影响，测试箱需要有绝佳的密封性保证气体不会泄漏或者外界的空气进入测试箱内，除此之外，还要考虑到低能 X 射线能够穿透测试箱表面到达丝室。如图 4.2 显示的是设计的测试箱的爆炸示意图，其中多丝室支撑为厚度 2 cm 的铝合金板。密封所用的为厚度 0.5 cm 的硅胶垫，测试箱护罩为不锈钢材质，由焊接和液压制而成，X 射线窗为厚度 $100\mu\text{m}$ 的软性 PCB 板，具体的几何数据可见其各部件尺寸视图 4.3。

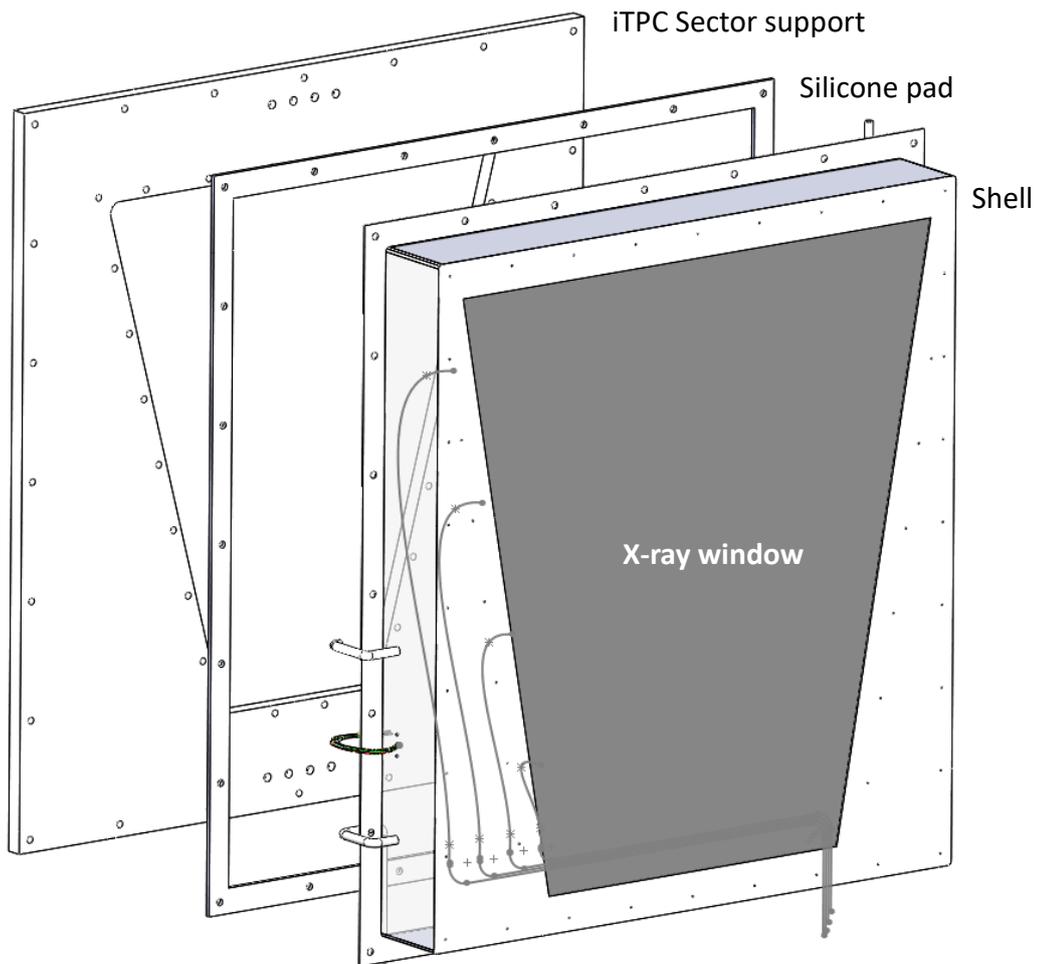


图 4.2: 测试箱爆炸示意图

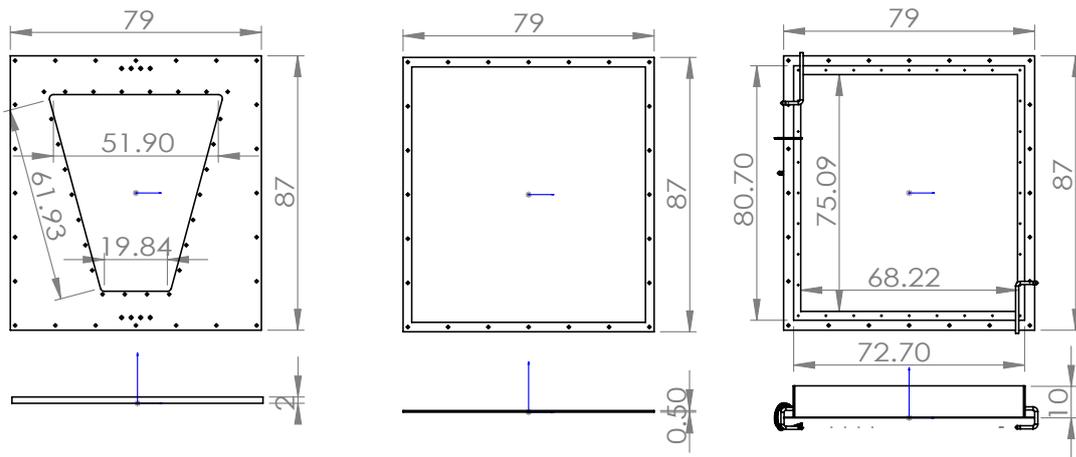


图 4.3: 测试箱各部件尺寸

4.2.2 放射源装置

^{55}Fe 采用的是直径为 0.5 cm 的面源，初始活度为 0.1 mCi(目前活度远低于此值，但用德制辐射测试仪测量，其辐射强度仍达 $1000\mu\text{SV}/\text{h}$)。后期强辐照测试更是采用的是 50 kV、 $1000\mu\text{A}$ 的 X 射线管。无论对哪种射线源来说，其强度都远超人体吸收的安全值。所以射线的防护措施非常重要，基本的防护策略为：射线源本身采用金属外壳打孔聚焦的方式来减小射线源的辐照角度：一级外围采用铅制软布阻挡泄漏射线；二级外围采用医用级别防护不锈钢门板。图 4.4a 显示的是 ^{55}Fe 防护外壳 3 维爆炸示意图；图 4.4b 显示的 X 射线管的金属外壳及聚焦端盖示意图。

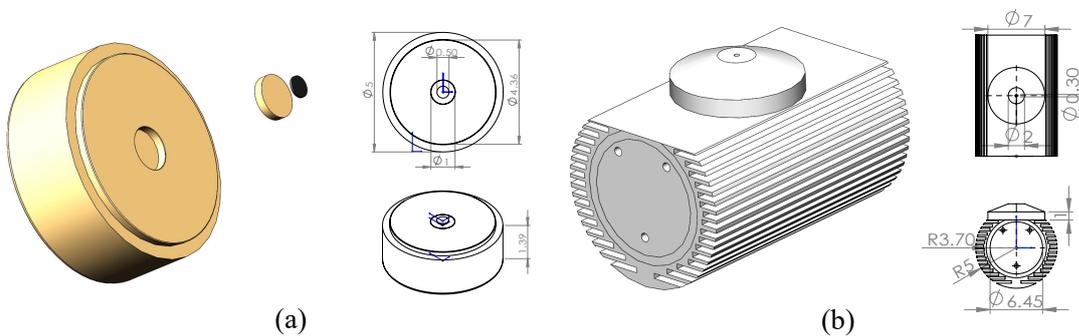


图 4.4: a 为 ^{55}Fe 防护外壳 3 维及尺寸示意图；b 为 X 射线管的防护罩外壳及聚焦端盖 3 维及尺寸

4.2.3 放射源三维移动平台

考虑到对160根阳极丝的增益扫描测试，和对射线源强度的控制，设计了二维扫描和升降平台。该平台由XY两轴步进导轨和升降托盘构成，因iTPC多丝室的纵横跨度比较大，所以该平台的导轨为定制长度导轨，升降托盘根据测试空间可适当调节射线源Z轴位置。如图4.5为二维导轨及相关尺寸。

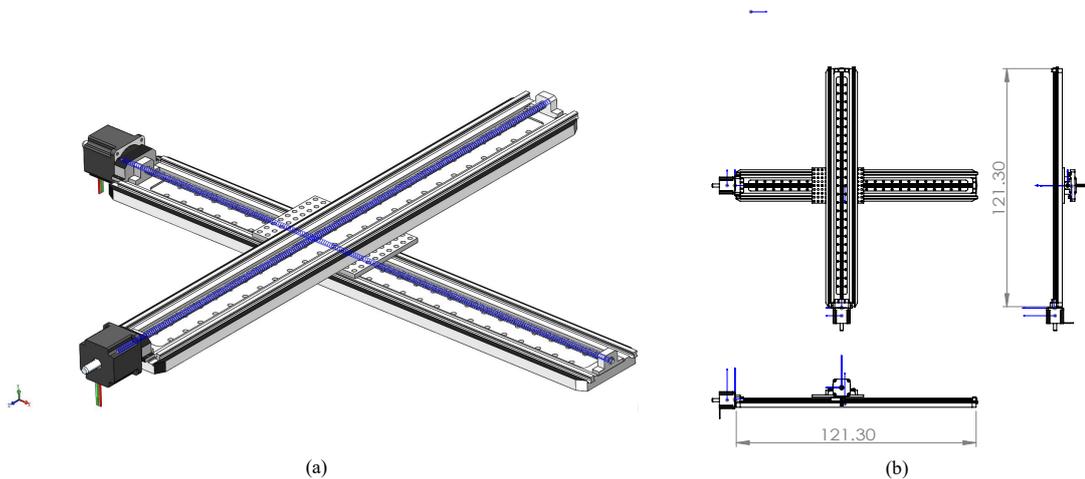


图 4.5: X-Y 二维步进导轨3维示意图及尺寸

4.2.4 混气仪及气体状态监控装置

测试所用气体为高纯 Ar 和高纯 CH_4 ，纯度均为99.999%，气体混合装置采用国内莱峰混气仪，混气精度为0.1%。为保证和控制测试箱内外压力差，除了控制出气油柱的高度之外，还采用了内外压差设备-压差计，采用的是瑞士 Huba 699 系列微压差变送器，如图压力精度为0.02 mbar。压差计不仅为内外气压差提供参考数据，还为通气速率提供了相对直观的参考。气体状态监控采用的是 BMP180 BOSCH 模块，如图，温度精度 $< 0.5^\circ\text{C}$ ，气压精度 $< 0.1\text{ mbar}$ 。状态数据获取采用 Arduino [63]单片机。BMP180 BOSCH 芯片内置I²C 通信协议，通过I²C 通信类可以实现单片机与该传感器芯片的通信和数据获取，其相关键参数和性能可参考表 4.2，具体使用方法可参考本章第6 节温度压力数据获取方法。

4.2.5 丝端信号放大及读出设备

因为 iTPC 多丝室的工作电压和增益($\text{Gain} \approx 2500$)相对较低，所以测试中需要先将丝端脉冲进行放大成形然后再进行数字化。本次测试中使用的放大器是

Items	Specification
General	Temperature measurement include, fully calibrated
Communication protocol	I ² C
Power supply	3.3 V
Pressure range	300~1100 hPa
Accuracy	0.06~0.02 hpa
Pin name	Descriptions
VIN	Power supply
GND	Ground
SCL	Serial Clock-I ² C Master/Slave clock
SDA	Serial Data-I ² C Master/Slave data

表 4.2: BMP180模块参数及相关性能



图 4.6: a 瑞士 Huba699 系列压差计；b BMP180 压力温度测试模块

Amptek A225, 其集成了电荷灵敏放大和成形的功能, 其中输出可以选择放大输出或者放大成形输出。对于放大成形输出部分的其相关参数为:

Items	Value
Amptek A225	
Sensitivity	240 mV/Mev(Si)
	5.2 V/pC
	0.83 μ V/electron
Polarity	Positive
Peaking Time	2.4 μ s
Integral Nonlinearity	< 0.04% for 0-10V
Dynamic Range	(Vs - 1.25) Volt
Operating Voltage	Vs = +4 to +25 VDC
DC Level	0.8 V nominal
Amptek MCA8000D	
Sample Rate	100MHz
Num. of Channel	8192
Dynamic Ranges	0~10V
Input Power	+4V-+5.5V
DC level of input signal	0V

表 4.3: Amptek A225放大成形部分的相关参数

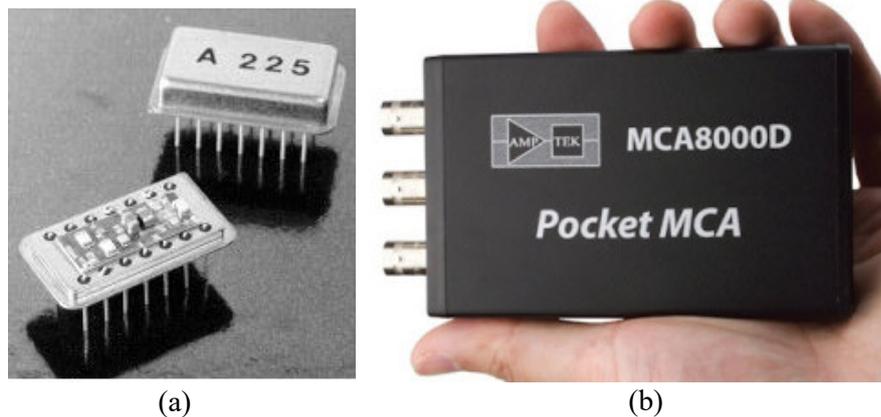


图 4.7: a 为 Amptek A225实物图; b 为 Amptek MCA8000D实物图

图 4.7a 为 Amptek A225 的实物照片。对于数据采集来说, 一般气体放大器实验中常采用的幅值数字化设备为多道分析器即 Multichannel analyzer (MCA), 该设备可将放大的幅值信息数字化, 测试方案中选用的 MCA 为

AmpTek MCA8000D。值得注意的是，A225的工作需要额外的 Amptek PC25 电路板的支持，该电路板基本的作用是给 A225 供电、提供相应的输入输出接口，由表 4.3 知道 A225 在工作的时候会输出一幅度为 0.8V 的直流信号，然而对于 MCA 来说，其要求的输入信号基线必须为零，这样就需要在将 A225 的直流部分过滤掉，解决方法是在 A225 信号输出端焊接一电容，只要保证该电容的时间常数能够满足信号的动态范围即可，本次实验中所连接的额外电容为 100nF。

4.2.6 高压电源

本测试中所用的高压电源为 CAEN 1471，相关的辅助测试中所用的插件有计数器 CAEN N1145、阈值甄别器 CAEN N844、符合器 CAEN N405，NIM 插件专用机箱为 W-ie-Ne-R NIM6000 Series。

4.2.7 系统集成

根据测试方案及所设计的硬件，结合各部分的尺寸、功能，测试系统可分为四大部分：1，支撑系统：测试箱、测试框架；2，放射系统：放射源、X 射线管，二维步进导轨；2，气体系统：包括气源、混气仪、通气管道、气体温度压力监测；3，电源系统：NIM 专用机箱及相关插件；4，数据获取系统：电荷灵敏放大器、成形、主放、多道分析器、服务器。图 4.8 显示的集成之后的3维示意图，图 4.9 为系统组成照片。测试箱置于特定的固定支架上，两端可根据需要旋转特定的角度；iTPC Sector 安装在测试箱内，丝面朝下，高压及读出部分朝上；X 射线窗距离阴极丝面约 1cm；为保证气体的流通性，通气管道分置于测试箱的斜对角；射线源平台置于丝室的正下方，可通过 XY 步进导轨和 Z 轴升降台对其进行3 维移动；压差计通过短管道直接接入测试箱内；温度压力传感器通过航空插头实现内外密闭连接。由于 iTPC 多丝室整个丝面的性能扫描的工作量很大，不仅测量点多，平面跨度比较大，还涉及到大量文件的保存等。机械操作上更是步骤繁琐，包括对阳极丝读出通道的更换，每测量一根丝便需要更换一次读出通道，每测量一个点便需要步进一次导轨，每测完一次数据便需要手动保存一次测量结果。考虑到 iTPC 丝室数量和所要花费的人力资源，多丝室性能自动化测试系统的设计和制作显得尤为重要。

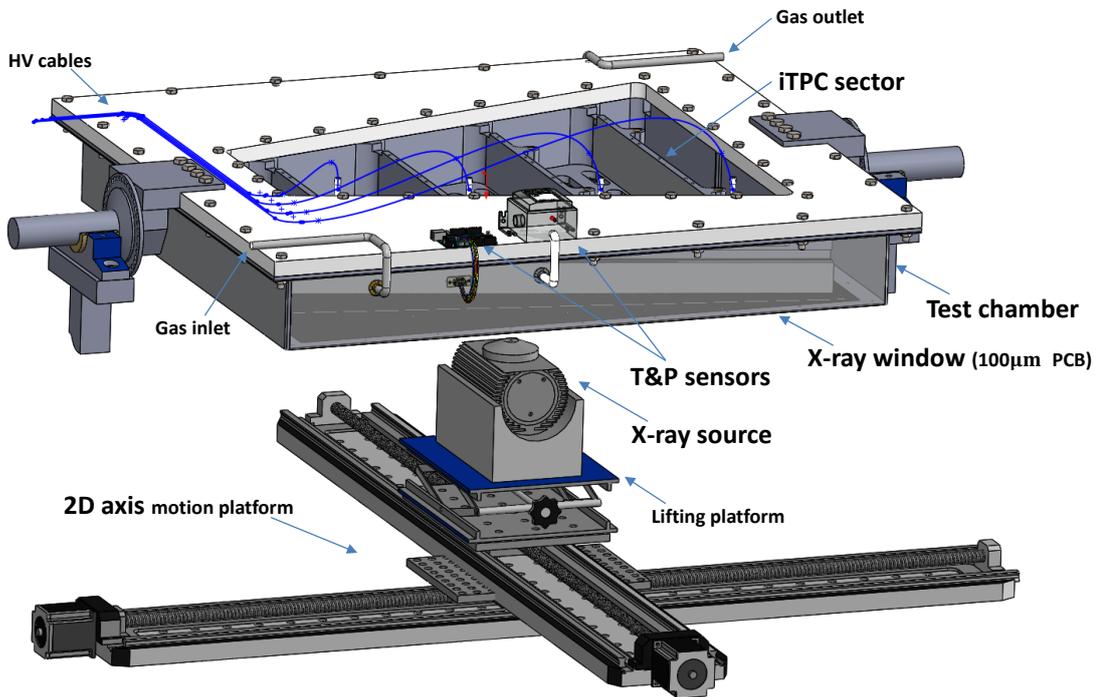


图 4.8: 测试系统集成示意图 [32]

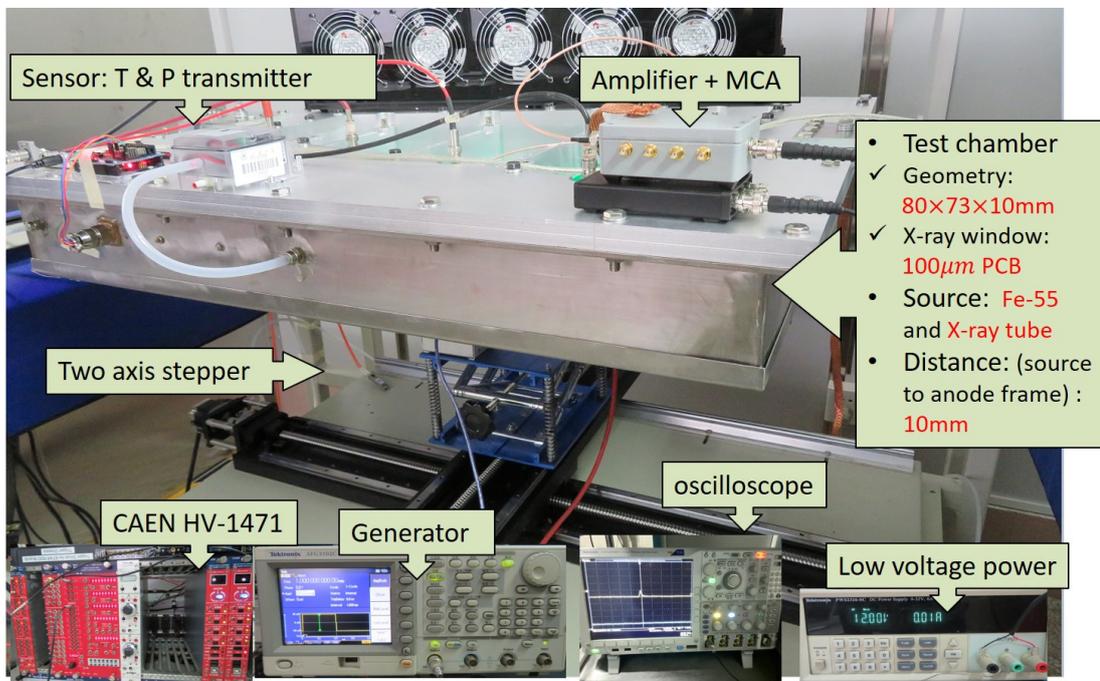


图 4.9: 测试系统照片

4.3 自动化测试系统设计和研发

4.3.1 自动化测试方案设计

设计之初所要考虑的因素有：第一，160根阳极丝信号的引出，每次只能获取一根丝的数据，这就需要160根信号线，并能进行通道选择；第二，考虑到每根丝要测量3个点，且探测器横向跨度比较大，还需要配合步进电机的自动步进；第三，步进电机步进到特定的位置之后，系统还能自动启动MCA的取数功能，获取一定统计量的数据之后能够自动保存并编号存储；第四，系统能够实时获取温度压强等传感器的数据；第五，每次测试步进电机都能够回归零点，不需要手动调整测试起点。这样基本上就实现了多丝室性能的自动化的扫描。数据获取及系统工作逻辑流程可参考图4.1。系统所要通信和控制的硬件有：X-Y二维步进电机、温度压强传感器、MCA、通道选择器。单个硬件的控制可以通过单片机烧入程序进行相应的控制，最后各组单片机其通过USB与计算机连接，实现计算机统一调度及控制。另外每一个独立硬件的控制还要考虑到控制、驱动器的选择，硬件控制程序的编写，各组硬件的空间布局，以及最后总的控制软件对各控制器的开关启动。因部分硬件会反馈较多的数据，并需实时显示在控制界面上，这样单进程编程的可行性就不存在了，需要进行多进程并发控制，即不仅要考虑到单个组件能够正常运行，还要考虑到协调运行的流畅度。

4.3.2 160路通道选择器设计和制作

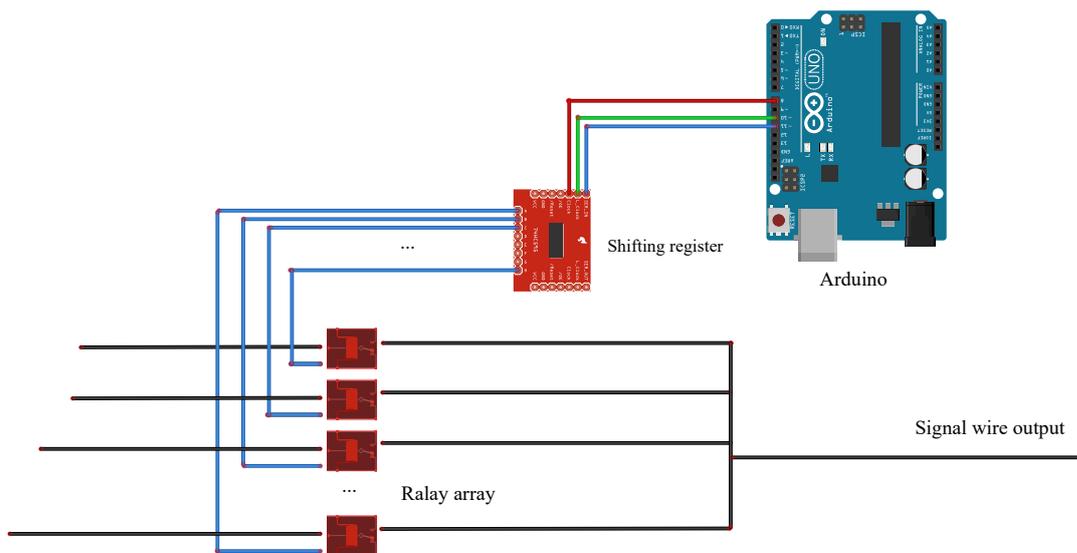


图 4.10: 通道选择器逻辑结构及工作原理示意图

因放射源几何结构及其射线发射角度等的原因，其射线可以覆盖 40 根阳极丝，即同一时间内有 40 根阳极丝存在信号。要得到丝性能均匀性的数据，单次测试只能读取一根丝上的信号，这样就对自动化的测试提出了第一个挑战，即要能够根据需要能够选择任一路输出。设计想法是，160路的输出信号线一端需要集成在一起，另一端各自有相应的读出针脚引出，并在中间设置硬件开关，能够实现任意一路的选通。本节主要就是介绍的是这 160 路通道选择器的设计和制作过程。图 4.10是 160 路通道选择器的逻辑结构及工作原理示意图。该通道选择器的组成有：160路信号输入输出线、160 路硬件开关、160路硬件开关控制器。其中信号线开关选用固体继电器，继电器控制采用移位寄存器和 Arduino 单片机。

4.3.2.1 固体开关阵列

市面上固体开关或者固体继电器阵列比较多的是 1 路、2 路、4 路、8 路和 16 路。本设计中采用的是 16 路继电器模块，将 10 块该模块集成到一个框架上，组成 160 路通道选择器。首先要考虑的问题是如何控制 16 路继电器模块，细节上如何实现。图 4.11为继电器内部电路原理，其中输入 1 和 5 代表的是

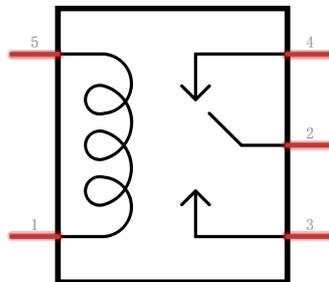


图 4.11: 固体继电器工作原理图

固体开关的控制线圈，4 常闭，2 为 COM 端，3 为常开端。来自阳极丝的读出引脚的信号线接入 2 和 3 输出端，当 1 和 5 为电源输入或接地端，两端存在工作电压差的时候，2 和 3 接通。16 路继电器模块正是集成了 16 个这样单独的继电器，图 4.12为该模块的实物照片。该模块采用光耦保护，I/O 口控制，低电平触发，5V 供电，由照片可以看到，除了 16 路的控制引脚外，还有 2 路接地 GND 引脚和 2 路供电 V_{in} 引脚。16 路的控制引脚可通过单片机的 I/O 口输出高低电平来控制继电器模块任意一路的开合。

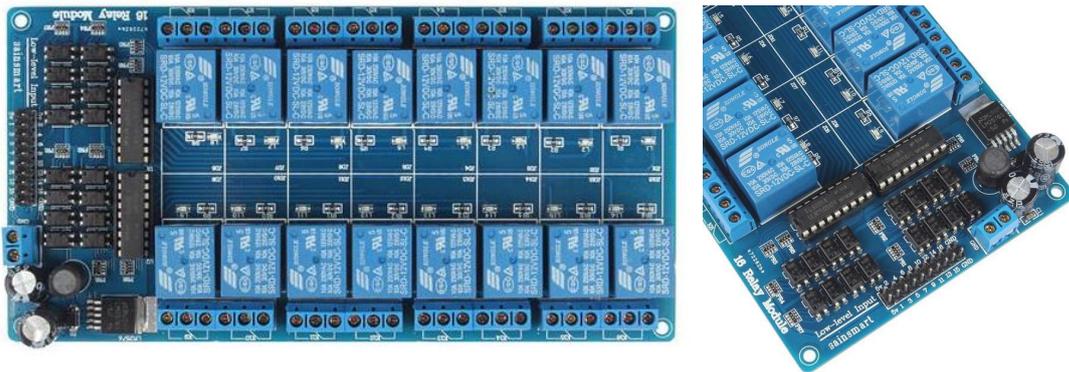


图 4.12: 16 路固体继电器模块实物照片

4.3.2.2 利用 Arduino 单片机进行 16 路固体开关模块控制

Arduino 单片机因其廉价易用、功能丰富强大，社区活跃度高，发展了自己的编译环境等特点，广泛以运用于企业和科研单位。从运动控制到数据获取，从工厂设备运转到医疗人体监控都能看到 Arduino 单片机活跃的身影。所以在该自动化测试系统的设备控制中，也同样使用的 Arduino 单片机。前面提到，该开关模块只需要 I/O 能够输入一低电平即可实现相应通道的触发，那么单片机 I/O 口控制不失为一好的方法。但对于 Arduino 单片机来说，其 I/O 口的数量有限，一个单片机的 I/O 口不足以控制一个 16 路继电器模块，需要用尽量少的 I/O 来控制尽量多的继电器。我们可以用移位寄存器芯片来实现单片机 I/O 的扩展，利用一个 8 位移位寄存器可以实现 Arduino 3 个 I/O 扩展为 8 个 I/O 口，而如果能够实现移位寄存器的级联，则能够实现 3 个 I/O 扩展为 16 个，如此可以扩展到很多，但因受单片机 I/O 功率限制，不可能实现大量的扩展。本设计中，采用的是 3 到 16 的扩展。首先看一下，移位寄存器是如何实现 I/O 口扩展的。移位寄存器可由若干个锁存器或触发器连接而成，除第一级之外，其他各级的控制输入均为前一级的输出，所有的触发共用一个时钟源。其除了具有储存代码的功能之外，还具有移位的功能。移位的功能通俗上来讲就是将其输出端的高低电平在控制脉冲的影响下可以按顺序移动，可实现对任意一路高低电平的控制和输出。本实验中采用的移位寄存器是 74HC595，是一款 8 位的寄存器，有 8 路输出，其控制引脚只需 3 路 I/O 即可。图 4.13 为 74HC595 芯片示意图，图 4.14 为 74HC595 的引脚分布及功能图表。能够用到的引脚有 Q0~Q7、DS、ST_CP、SH_CP、Vcc、GND 以及 Q7' 引脚。其中 Q0~Q7 为输出引脚，DS 为 8 位二进制数据输入引脚，SH_CP 为移位时钟引脚，ST_CP 为时钟锁存器引脚。与单片机连接的引脚有 Vcc 即单片机 5V 引脚，GND 连接单片机接地，DS、ST_CP、SH_CP 连接单片机任意 3 个数字 I/O 口即可。最后 Q7' 用于级联(slave) 下一级移位寄存器。那么由单片机的 3 个 I/O 口控制并级

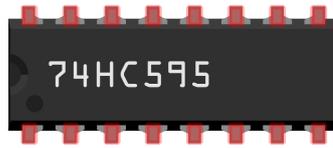


图 4.13: 74HC595芯片

PINNING

SYMBOL	PIN	DESCRIPTION
Q ₀ to Q ₇	15, 1 to 7	parallel data output
GND	8	ground (0 V)
Q ₇ '	9	serial data output
MR	10	master reset (active LOW)
SH _{CP}	11	shift register clock input
ST _{CP}	12	storage register clock input
OE	13	output enable (active LOW)
D _S	14	serial data input
V _{CC}	16	positive supply voltage

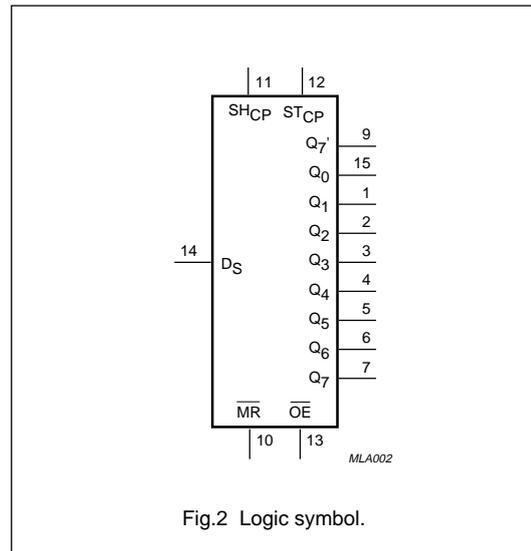
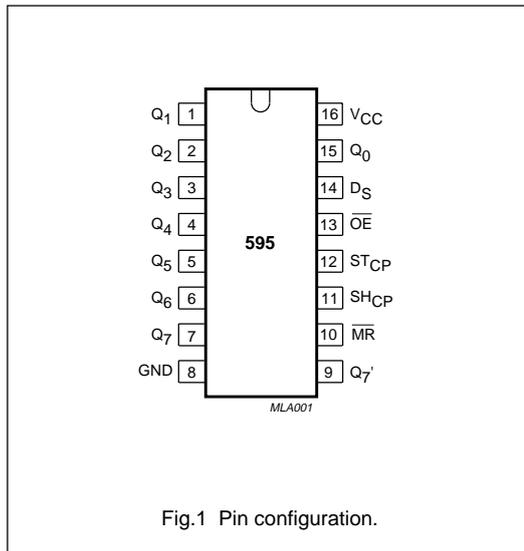


图 4.14: 74HC595芯片引脚分布及功能图表

联 2 个 8 位移位寄存器的电路连接可参见图 4.15。图 4.16 为实物连接图，通过

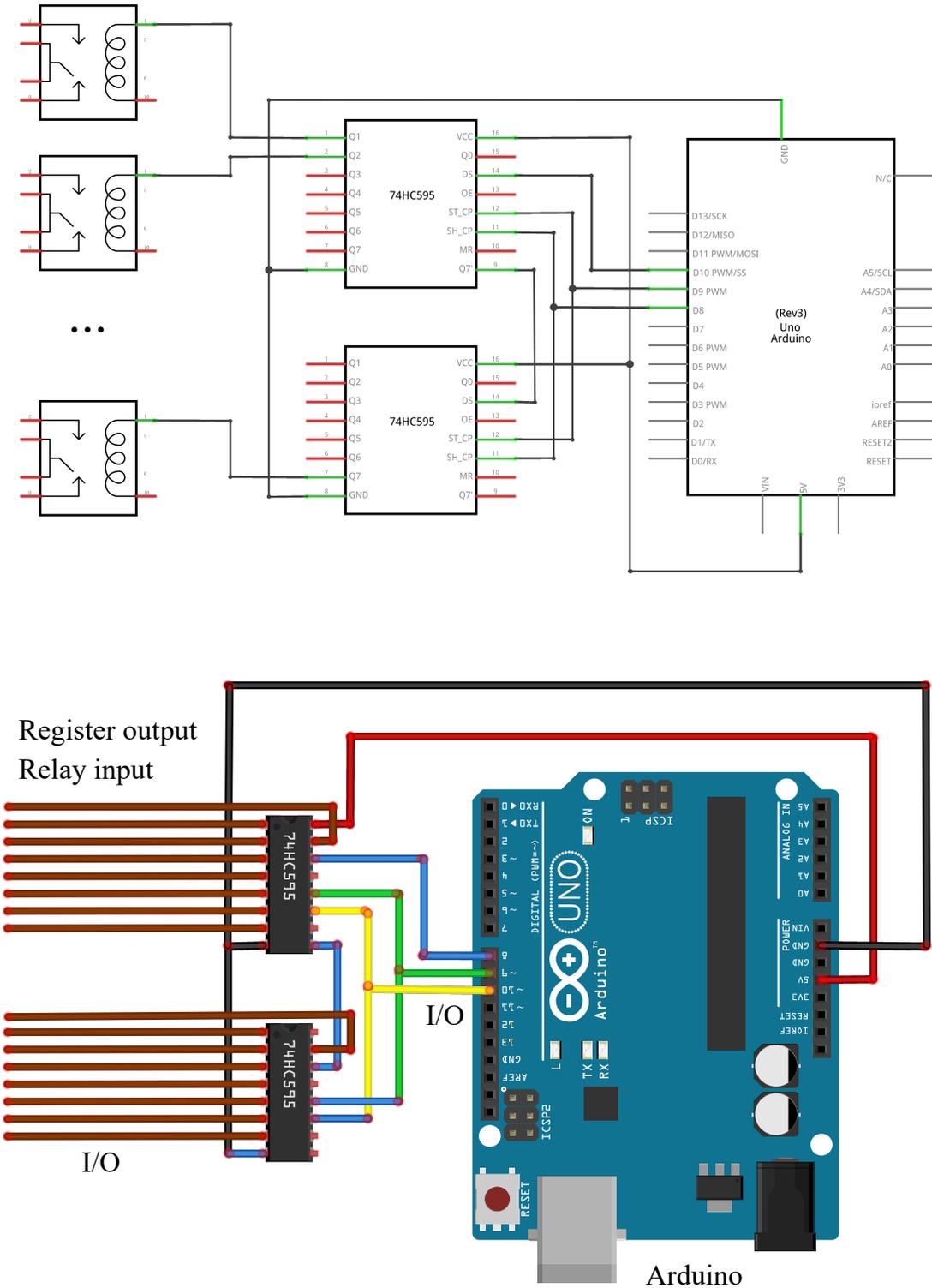


图 4.15: Arduino 级联 2 个 8 位移位寄存器各针脚走线示意图

此连接便可实现 Arduino 3 个 I/O 控制 16 路继电器模块了。其相关的控制程序可参加代码块。值得注意的是 16 路继电器模块为低电平触发，所以需要预先使

移位寄存器的每一路都输出为高电平，这样才能避免在单片机启动时所有的继电器被同时点亮打开的情况，因为这样会给单片机本身带来比较大的负担。单

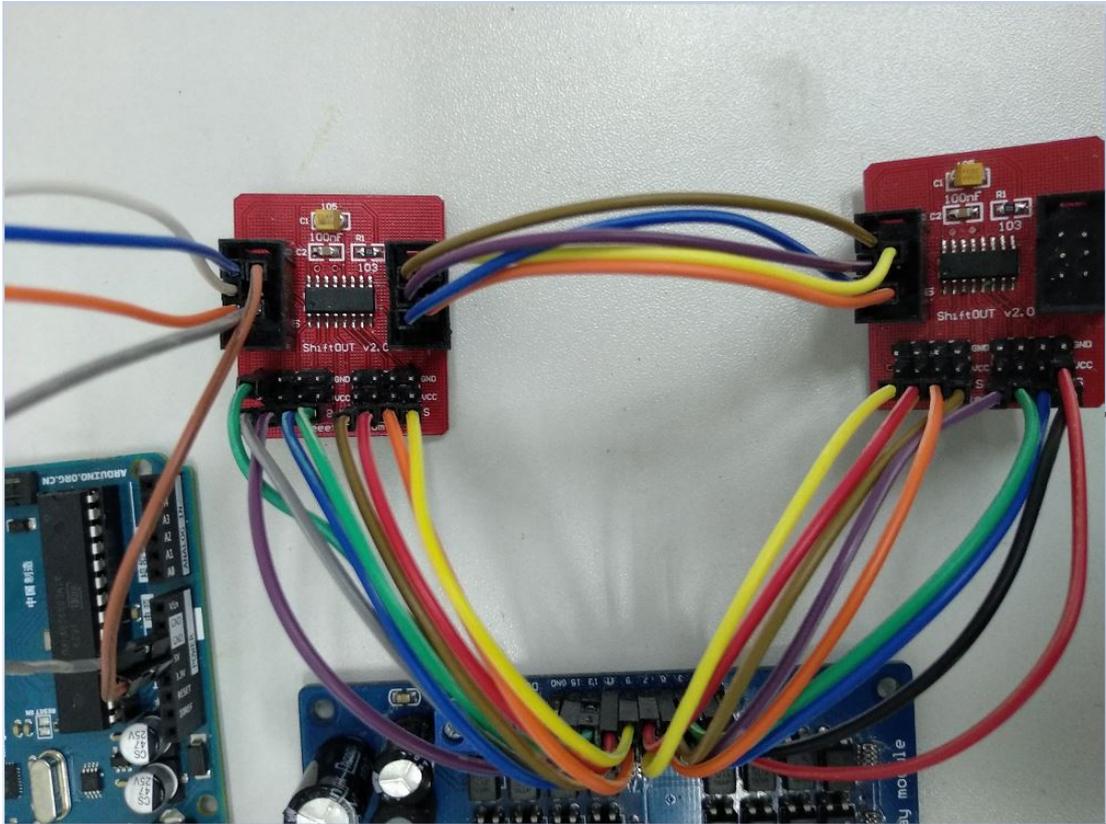


图 4.16: Arduino 级联 2 个 8 位移位寄存器的实物连接图

片机控制移位寄存器的一般步骤就是，先将锁存器的 I/O 口输出低电平，给移位寄存器一个触发信号，然后调用 Arduino *ShiftOut()* 函数来写入控制信息，想打开哪一路，就将二进制 “byte” 哪一位设置为 “0” 或者 “Low”，最后在给锁存器引脚一个高电平，示意数据操作结束。因为级联了一个次级(slave)移位寄存器，所以，在使用 *shiftout()* 函数的时候，需要连续调用两次，这是硬件级联方式本身多决定的，同样如果还有第三级的移位寄存器，则需要调用该函数三次。

4.3.2.3 160 路固体开关集成框架设计与控制集成

由以上两节的讨论可知，160 路固体选择器所包含的组件有：10 块 16 路继电器模块；20 块移位寄存器；160 路电平输出，共需要 $160/16 \times 3 = 30$ 路 I/O 口，所以需要有一个数字 I/O 比较多的单片机；另外还要考虑到将所有的这些组件集成到一起，这就需要设计额外的安装框架。最后的设计方案是，单片机采用拥有 54 路数字 I/O 口的 Arduino Mega2560;支撑框架采用有机玻璃，正

六边体设计，既能节省框架所占空间又能便于安装和相关操作。每一面能够容纳 2 组 16 路的继电器，5 个面即可容纳所有的固体继电器模块，最后一个面可以用来安装控制器和信号输入端子。图 4.17 即所设计的通道选择器整体安装

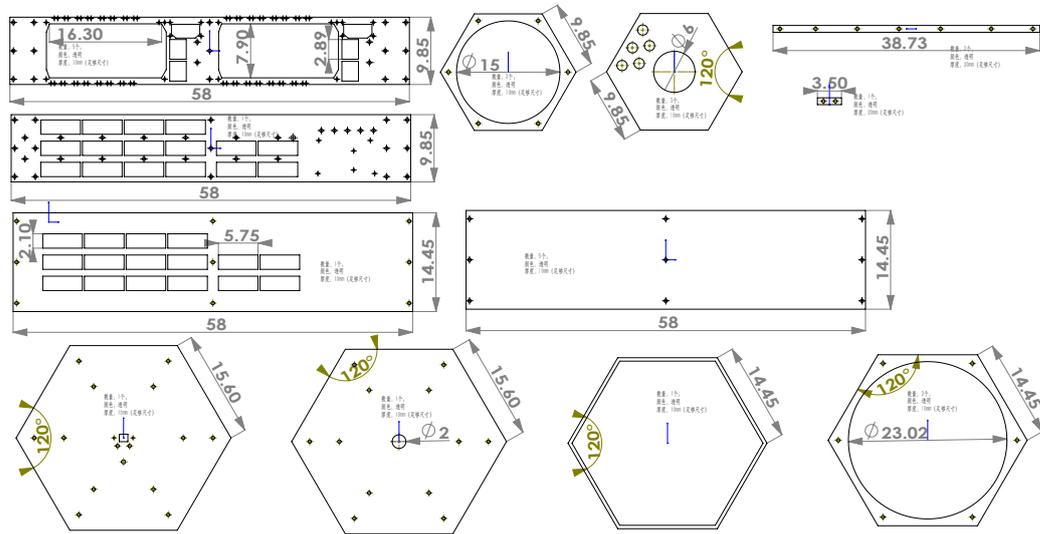


图 4.17: 160 路通道选择器的整体安装框架设计图

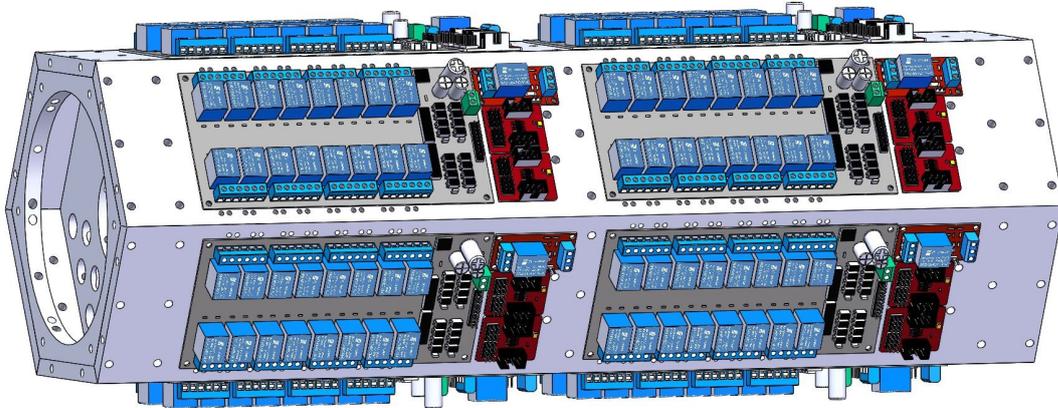


图 4.18: 160 路通道选择器的整体安装框架示意图1

框架设计图，其中左上第一部分为继电器模块、移位寄存器等的安装部分，靠近右边的正六边形安装部分的支撑骨架。左上第二个为信号输入端子以及单片机的安装部分，其余为该框架的最外层。图 4.18 是整个通道选择器集成之后的一个斜视图，主要显示的是通道选择器中继电器模块与移位寄存器部分。图 4.19 为继电器模块与移位寄存器微观安装视角，每个 16 路继电器模块与 2 个移位寄存器模块为一组，外加一个单独的继电器用于整个继电器模块的通断，保

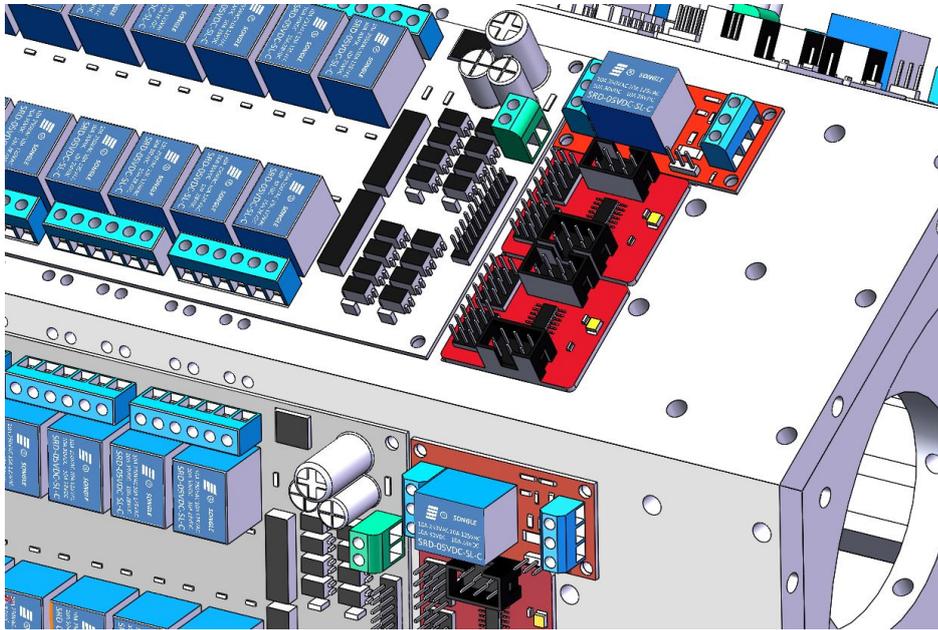


图 4.19: 160 路通道选择器继电器与移位寄存器微观视角

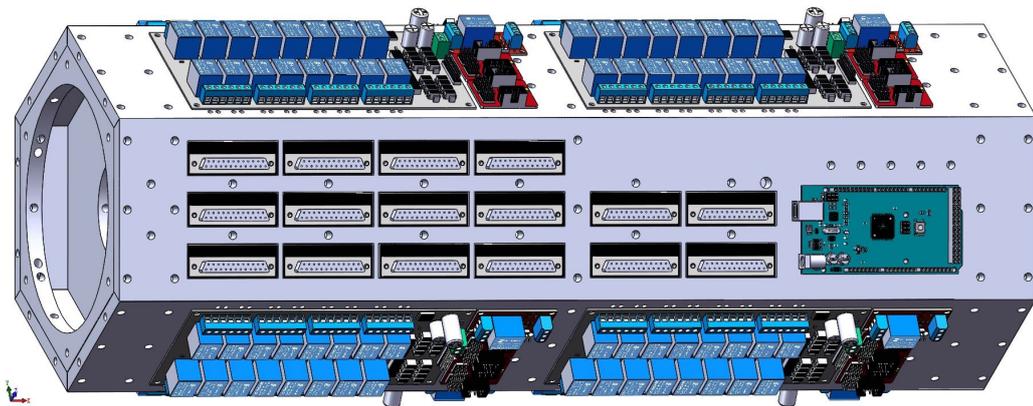


图 4.20: 160 路通道选择器的整体安装框架示意图2

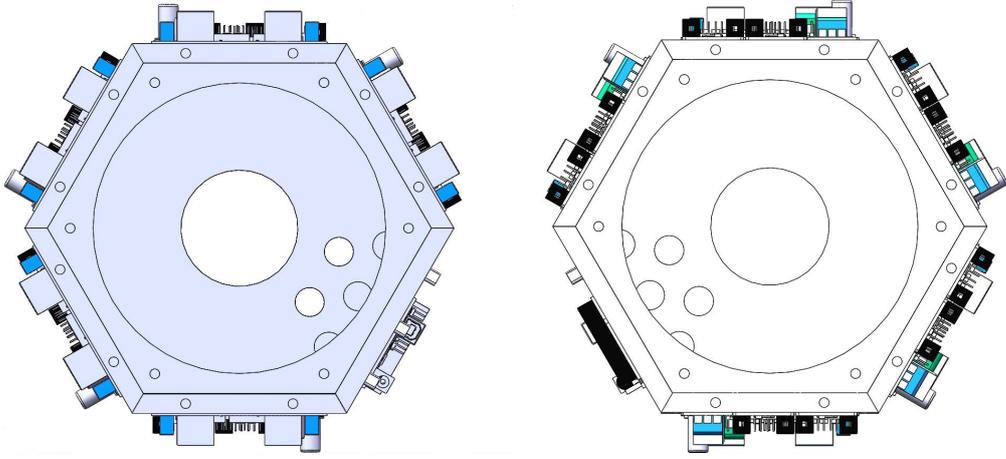


图 4.21: 160 路通道选择器的侧视

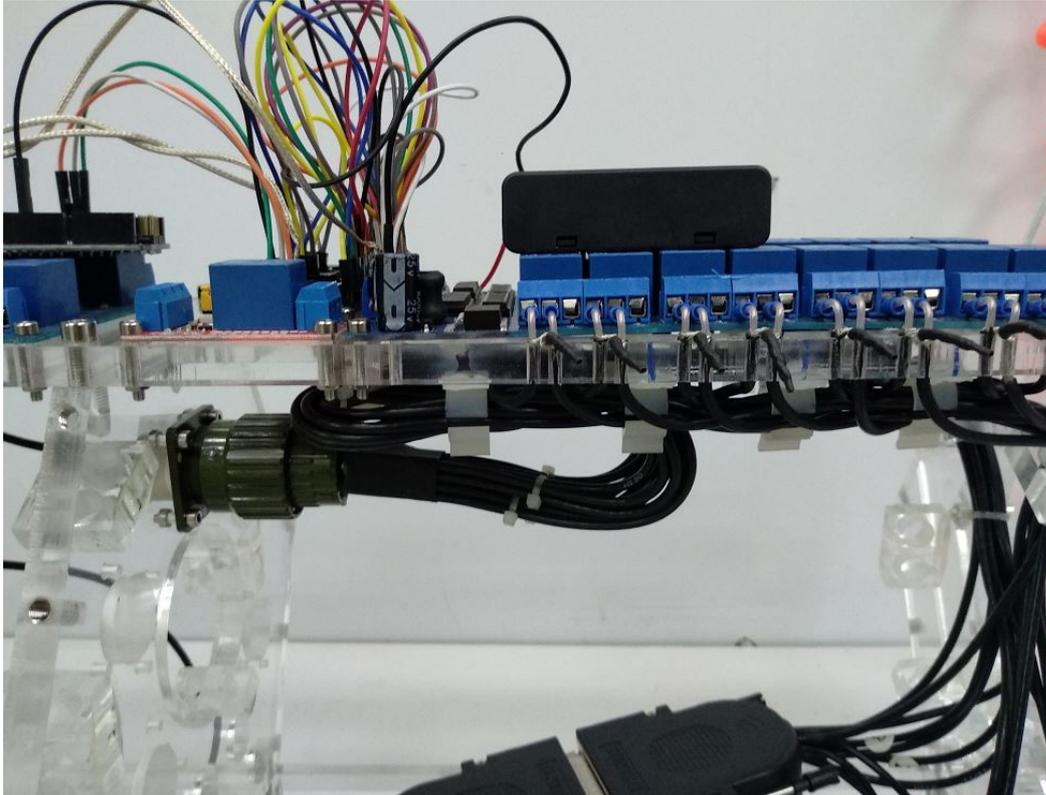


图 4.22: 160 路通道选择器制作

证工作的时候只有一个继电器模块组供电，降低单片机的工作压力。图 4.20 为通道选择器信号输入与单片机控制部分，160 路输入总共分成了 16 个部分，每个部分的连接端子采用的是 DB25 免焊接接头，Arduino Mega2560 安装一端。图 4.21 为通道选择器的测试部分，同时也是连接电源、USB、信号输出的部分。图 4.22 为通道选择器的制作图片，显示的是一个通道模块的走线及安装布局。

4.3.3 二维步进系统控制

前面提到步进系统要与通道选择器配合工作才能保证丝端信号的强度不会随着位置的改变而发生相应的变化，所以对二维步进系统相对精确的控制就显得尤为重要。对于一个步进系统或者是步进平台来说，其主要有以下几个部分构成：步进电机、步进导轨、导轨托盘、步进系统控制器。而步进系统控制器则由微控制器、步进电机驱动器、开关电源等构成。本节具体介绍如何利用微控制器和其他辅助设备对步进电机进行自动控制。

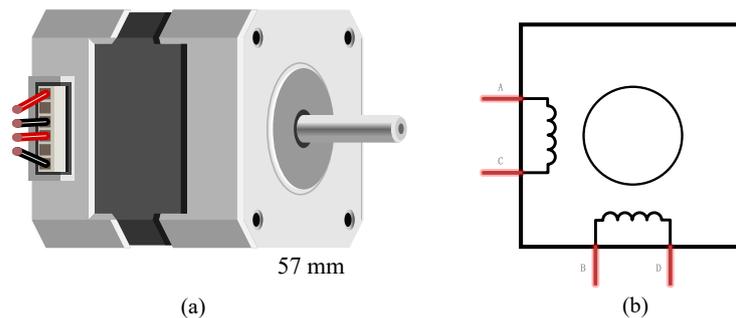


图 4.23: 57 系列两相步进电机电气图示

4.3.3.1 步进电机控制原理

本实验中所采用的步进电机为 2 相 57 系列步进电机，该型号的电机为方形机身，方形尺寸为 57mm，其定子线圈为两相驱动，故而称为 57 系列步进电机。图 4.23a 为 57 系列步进电机的 3 维实物示意图。b 为两相驱动步进电机的电路图示，因为是两相驱动，故其定子线圈内有 2 个独立的绕组，对各绕组给予时序不同的电压脉冲，就能实现特定角度的旋转，具体可参考。一般的步进电机驱动电流比较大 $> 1A$ ，而对于微控制器来说，这么大的电流是承受不住的，所以需要有一个能够输出大电流脉冲的中间设备，这就是步进电机驱动器。所以步进电机控制的逻辑可以总结为图 4.24。

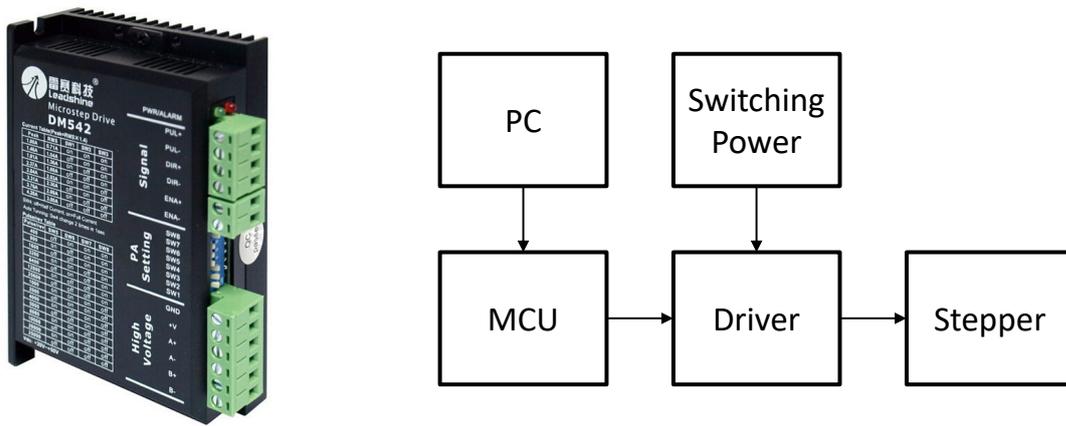


图 4.24: DM542 步进电机驱动器实物图和步进电机控制逻辑

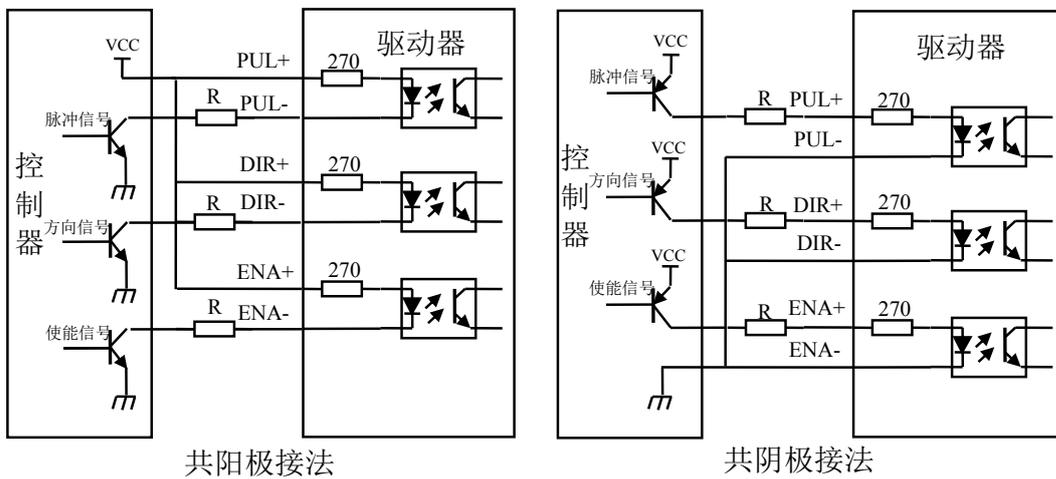


图 4.25: 步进电机驱动器与微控制器连接方法

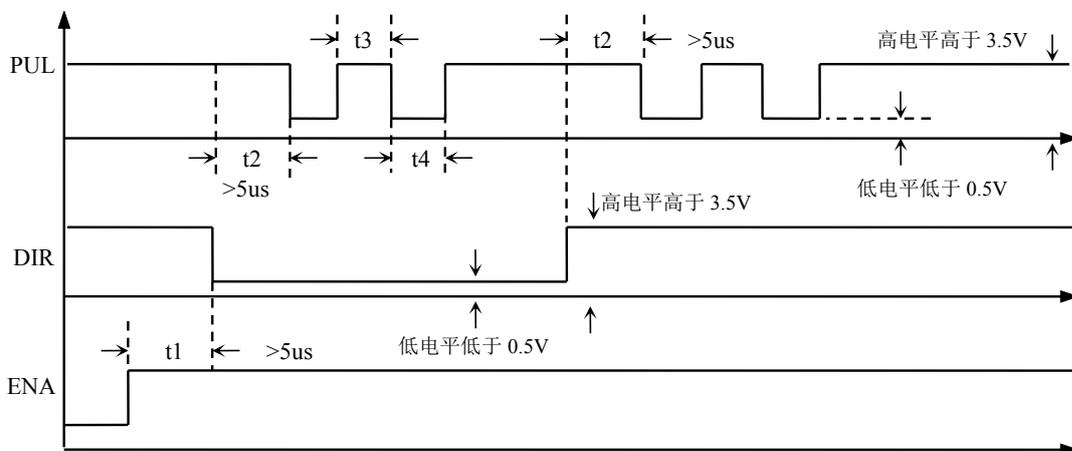


图 4.26: 步进电机驱动器各控制信号时序图

4.3.3.2 步进电机驱动方法

本设计中所采用的步进电机驱动器是数字式两相步进驱动器 DM542，如图 4.24 左，由图右的控制逻辑也可以看到，其输入输出引脚主要分为三大部分，其一是微控制器控制信号部分；其二是步进电机控制信号输出部分，其三是开关电源供电部分。对于控制信号输入部分，其共有三个引脚，或者是 3 中控制功能，分别是：(1)PUL：即控制脉冲输入，该控制信号可以通过控制器代码调节脉冲的宽度或者是频率，达到控制步进电机速度的目的；(2)DIR：该引脚为步进电机方向控制，通过改变为控制器 I/O 的高低电平可以控制步进电机改变旋转方向；(3)ENA：该引脚为步进电机使能部分，给该引脚提供高电平，可以使步进电机停转或者是驱动器停止给步进电机供电，此时步进电机处于不加电的松弛状态，可以自由旋转。对于这三个引脚如何与微控制器相连，可参考图 4.25。本设计所采用的共阴极连接，即阴极部分与单片机的接地连接到一起，阳极部分分别连接单片机的 3 个 I/O，通过 I/O 高低电平的转换来实现对每项功能的操作。一般的当微控制器的本身的工作电压 VCC 为 5V 时，R 短接；VCC 为 12V 时，R 为 1K；VCC 为 24V 时，R 为 2K(大于 1/8W 电阻)。对于该款驱动器来说，3 中功能控制信号的输出的时序是有一定要求的，具体看参考图。其中对于脉冲信号或者是步进电机旋转信号来说，要步进多少步就需要多少个方形脉冲，图示中有两个方波，则步进电机会步进两步。对于方向信号来说，要改变步进电机旋转的方向，必须在步进脉冲即 PUL 之前先给一个触发或者是高低电平，当所有的步进脉冲发送完之后方向信号再给一个电平进行收尾。换句话说就是方向信号需要将步进脉冲包裹起来，这一步分具体操作可参考后面的控制程序的编写。最后使能控制需要在前两个控制信号之前发送。具体的每种信号的宽度和提前时间可参考图 4.26。

对于步进电机驱动器而言，其不仅可以提供步进电机运动所需的大电流，还可以细化控制脉冲，对步进角进行细分。比如本实验中所采用的步进电机，单步设计为旋转 1.8° ，旋转整圈需要步进 200 步，通过驱动器的细分功能，可以将一圈的步数或者是每步进一步所旋转的角度进行细分，达到对步进距离的精确控制。DM542 驱动器采用 8 位拨码开关设定动态电流、步进细分精度、工作模式等功能。本设计所采用的细分是，每旋转一圈需要步进 400 步，而实验中所用的丝杠导程为 5mm (即丝杠旋转一周，丝杠托盘所前进的距离)，那么单步距离为 $5\text{mm}/400 = 12.5\mu\text{m}$ 。因为 iTPC 阳极丝间距为 4mm，所以为了让放射源相对于丝的位置不变，横向需要移动 4mm，即横向移动 $(4/5) \times 400 = 320$ 步。

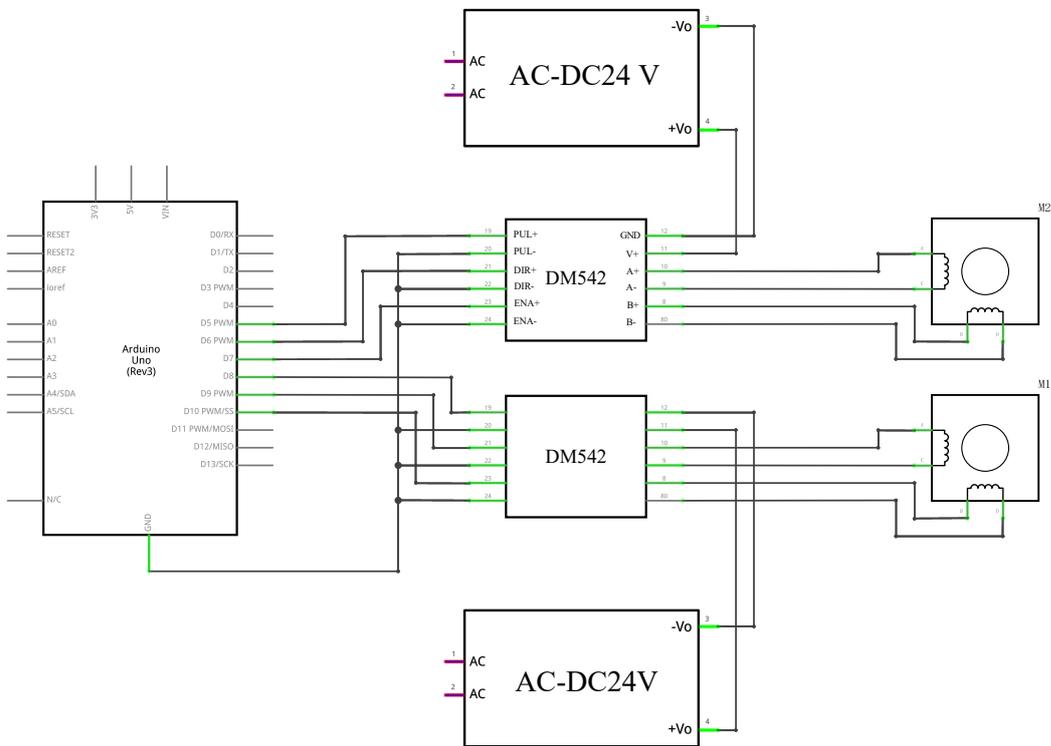


图 4.27: Arduino 控制两个步进电机的组件连线示意图

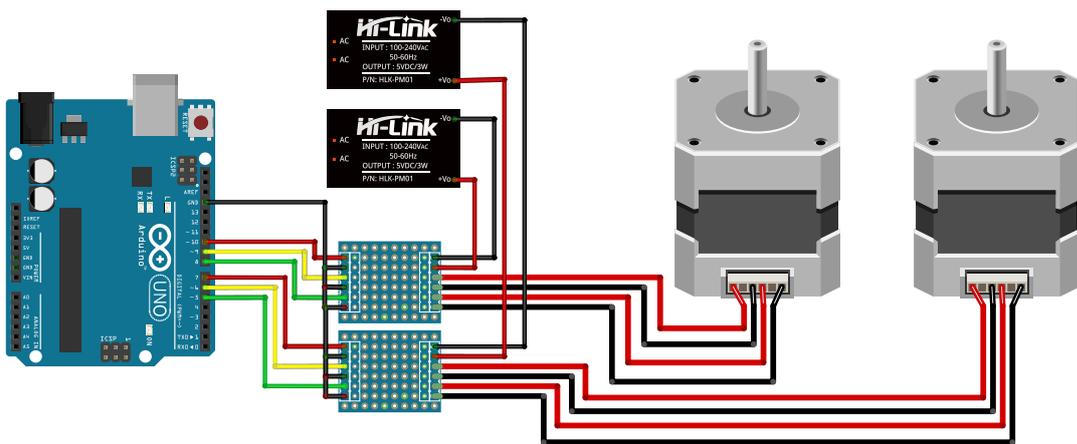


图 4.28: 单片机、开关电源、驱动器引脚以及步进电机连接图

4.3.3.3 步进系统连接

图 4.28为单片机控制两个步进电机的实物连接图，图 4.27显示的是 Arduino 与其他组件的连线原理图，连线图中可以得到各部件针脚直接的一一对应关系，图 4.29 是将控制步进电机的各部分组件集成制作完成的控制箱照片。

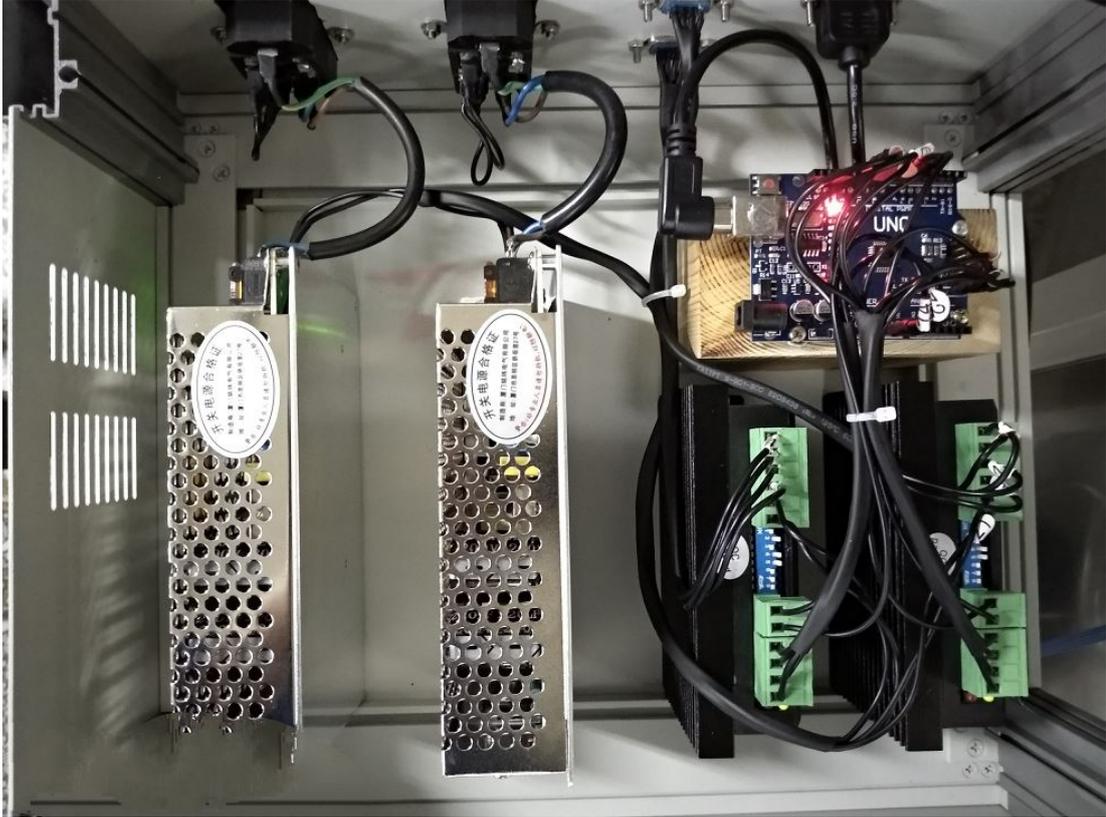


图 4.29: 集成并制作完成的二维进系统控制箱照片

相应的 Arduino 控制步进电机的程序可参见附录 B 代码块，代码块列出了相应的功能的代码示例，可根据个人需求修改。

4.3.4 位置感应与平台归零

考虑到丝端信号的事例率与放射源的相对位置有关，所以测试系统需要有一个起始点，该点位置能够保证所要测的第一根阳极丝的事例率很高，我们把该点称之为系统测试的起点或者是零点。要确定零点的位置可通过两种方式，一种是通过软件记忆步进电机的相对位置；一种是依靠硬件的反馈，有严格的机械零点。第一种方式的优点是，不用额外的硬件可直接通过软件进行记忆。缺点是，一旦软件断电或者是步进电机被手动转动过，则软件记忆的位置便会出现差错。第二中方案则提供了一种固定的零点位置，本测试系统中采用的是第二种方案。

位置感应的设备有很多中，比如红外感应，激光感应。红外感应的优点是，价格低廉，可感应相对位置，但位置精度不够。激光感应的优点是可进行相对精确的定位，本设计中采用的就是激光对射光电开关进行零点定位。图 4.30 显



图 4.30: 激光对射光电开关照片

示的是激光对射开关的照片，一模块用于发射激光，一模块用于接收。该模块的优点是可以兼容 Arduino，反应时间只有 5 ms，且有效距离可达几十米。当接收方接收到激光信号后，会输出一高电平，如果激光被档则输出一低电平。将这一信号与步进电机控制的使能部分相关连，便能够做到，当激光被遮挡时，步进电机停止运动，即达到零点归位的目的。其与单片机的连接可参考图 4.31，相应的其工作代码可参考附录 B 的代码块。

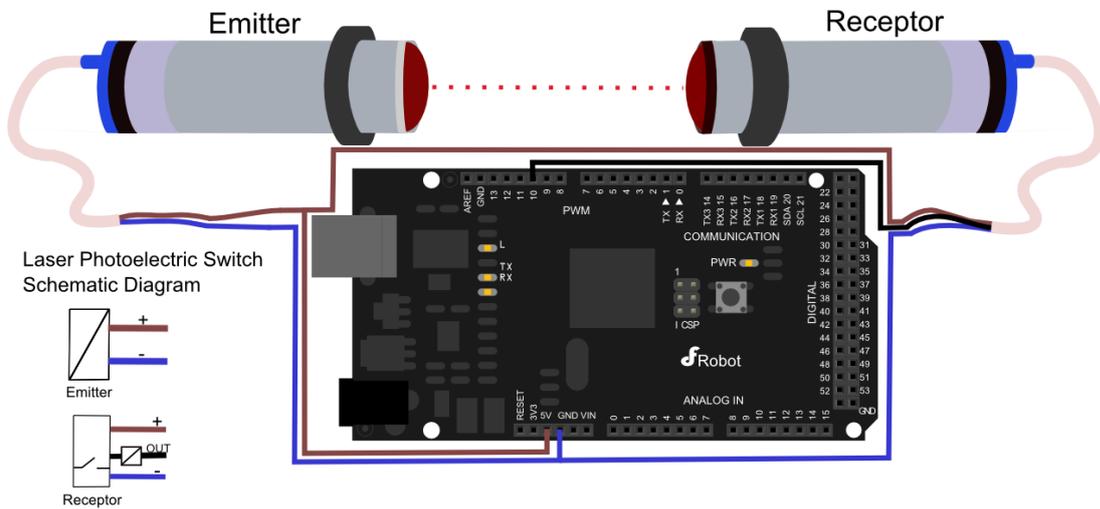


图 4.31: 激光对射开关与单片机的连接图示

4.3.5 温度压力传感数据获取

第四章提到我们所用的气体状态监控模块为 BMP180，该模块的精度较高，压力精度对高可达 0.02 mbar，采用 I²C 通信，需要配合单片机来使用。

I²C 通信主要依靠两个引线 SDA 和 SCL，即数据线和时钟线。BMP180 模块有 4 个引脚，分别为 V_{in}、GND、SDA、SCL，它们分别与单片机(Arduino uno)的 3V3 电压引脚，GND 接地引脚，A4 引脚以及 A5 引脚。具体的走线及实物连接示意图可参见图 4.32a 和 b。相关单片机通信程序可参见附录 B 的代码块，

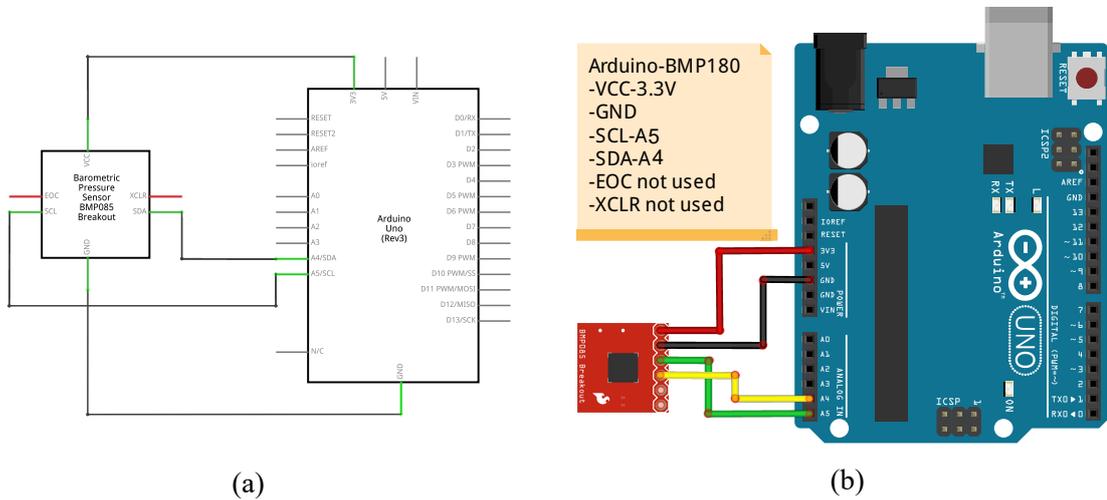


图 4.32: a Arduino-BMP180走线示意图; b Arduino-BMP180连接示意图

程序中一定要加载相关通信类和初始化串口，温度与压力获取直接调用该模块自带类即可。

4.3.6 MCA 控制和通信

实验中所用的 MCA 是 Amptek MCA8000D，该款 MCA 拥有极高的采样率(100MHz)和精度(16bit)，8k 的数据通道，通过 USB 实现计算机通信。个人可以通过修改相应的 (SDK) 软件开发包实现自定义的通信与数据获取功能。具体的，MCA8000D 的核心部件- 波形数字化板卡 DP5 广泛用于 Amptek 的数字化设备上，所以 MCA 通信与数据获取开发也都是基于 DP5 软件开发包 Cross Platform C++ DP5 SDK。该款软件开发包，采用 C++ 编程，可在 Linux，Windows 等多平台上进行二次开发和使用。所以本系统中为实现对 MCA 的通信与操作，同样是在该软件开发包的基础上进行定制和修改的。考虑到测试所用平台为 Windows，所以最终选用的软件开发包为 vcDppConsoleWinUSB。

该款软件开发包因其封装良好，接口易调用等特点，所以比较容易实现对 MCA 通信与数据获取功能的二次开发。首先软件开发平台为 VS2010，开发语言为 Visual C++，项目为控制台程序。首先是 VS 开发注意事项，一般的开发包程序，都会有自己特定的库，当进行编译链接的时候，一定要保证这些库能够链接上。比如该通信软件所使用的通信驱动为 winusb，所以编译的时候一定要将库链接上，否则编译不会通过，其他库也是如此。其二，软件开发包通信

接口一般都在主函数里，想对 MCA 实现自定义的功能，可通过修改主函数相应的运行逻辑和其他成员函数的实现细节，达到自己定制的目的。外部控制程序可通过标准输入输出来实现与主函数的通信，主函数通过添加标准输入输出命令文本的判断从而实现自定义控制。

4.3.7 控制及数据获取软件开发

4.3.7.1 软件架构及功能设计

对于整个测试系统来说，要实现自动化测试，首先必须要有一个比较友好的测试界面；其次，要对数据能够可视化；第三，可以自动保存数据；第四能够实现多线程；第五程序运行除平台外，无需额外依赖。具体的，需要实现的功能有：(1) 步进电机控制，包括手动和自动，涉及到与步进电机微控制器进行串口通信；(2) 温湿度传感器数据获取、实时显示及保存，需要用到图形显示，串口通信；(3) MCA 通信与数据获取，同时也需要数据可视化，涉及外部进程启动和通信；(4) 系统状态记录。

4.3.7.2 开发平台介绍

整个软件开发采用 win 下的 Qt5，开发语言为 c++，是一款可跨平台的图形用户界面应用程序开发框架。该框架集成了图形用户界面、串口通信、数据可视化、多进程编程等丰富的接口函数，其集成开发环境功能齐全，可比较方便地满足定制程序开发。同时，利用相应的插件，Qt 可迁移到 Visual Studio 的集成开发环境，对不熟悉 Qt 集成开发环境的用户，同样可以轻松地上手和使用。

4.3.7.3 功能实现

因为软件要与硬件微控制器打交道，所以最先考虑的是串口通信问题，Qt 提供了相应的串口通信类来满足图形用户界面或控制程序对串口的操作调用。对串口的操作一般有：(1) 串口选择；(2) 串口打开；(3) 串口参数，包括波特率、数据位、停止位、奇偶校验等的设置；(4) 串口关闭。Qt 中对串口的相关操作的一般演示可参见附录 B 代码块。

因为该软件还要调用 MCA，所以需要调用外部进程(.exe)并与之通信，Qt 中相应的操作为可参见附录 B 代码。其启动方式可以以不显示外部程序图形界面或者是控制台程序的对话框的形式启动，并且不阻塞主进程。其中用 *write()* 函数可以向 MCA 控制台程序发送标准输出，MCA 控制台程序，可以通过标准输入 *cin()* 函数判断实现主进程与 MCA 的通信。

4.3.7.4 数据可视化

控制界面中，对采集到的相关数据进行可视化，可以帮助我们很好地监控系统是否正常运行，是友好化编程的重要方法。该系统中，温湿度压力的数据还有 MCA 所获取到的数据都是动态的，所以数据的可视化需要加入动态效果，即实时显示效果。*QCustomPlot* 是一款精致简单的 Qt 外部绘图插件，该插件调用 Qt 的图形化类，封装了自己的函数，使得画图等相关可视化功能变得简单、易用。可对画布、坐标轴、字体等格式及风格设置，由于可充分调用 Qt 类，故可以实现比较丰富的绘图效果，也可以根据自己的需求添加相应的接口。具体的定义和参考可参考相关附录，其中 *connect()* 函数起到了温度压力传感器数据更新的功能，或者是起到了自动调用 *PlotTP()* 的功能。

4.3.7.5 多线程处理

上面提到了，除了主线程之外，还需要定义其他的子线程用来处理各组的数据和通信。具体的，主线程用于各线程之间的调节，以及主次之间的通信。分配一线程用于温度压强数据获取，一线程用于步进电机控制，一线程用于 MCA 通信，如此则共 4 个线程。Qt 相应的也提供多线程编程方法，除主线程之外需定义额外的其他 3 个类，但必须继承 *QThread* 的方法，主线程中则直接调用相关子线程的相关函数和功能。

4.3.7.6 GUI 编写

最后是 GUI 的编写，本设计中 GUI 总共分为 4 个区，分别是温度压强区，MCA 区，步进电机区还有系统输出区。利用 Qt *GroupBox* 类分别在四个区内添加相应的组件的和排版。图 4.33 显示的最终集成之后的控制软件截图。其中左上角能够看到温度压强的实时显示与输出，右上能够看到对步进电机各轴的控制和归零操作，左下可以看到对 MCA 数据的获取，右下能够看到相关的系统输出信息。另外，能够从该界面上看到，操作模式存在手动和自动两种，具体如何操作可参考下节内容。

4.3.8 系统运行

软件的使用分手动和自动两种，系统启动先点击 ”Power 来给系统供电，然后点击 ”Start”，则系统首先会判断步进电机位置，如果不在零点位值，则自动归零；其次，系统启动温度压力传感器和 MCA；最后会从第一根阳极丝开始扫描测试增益。

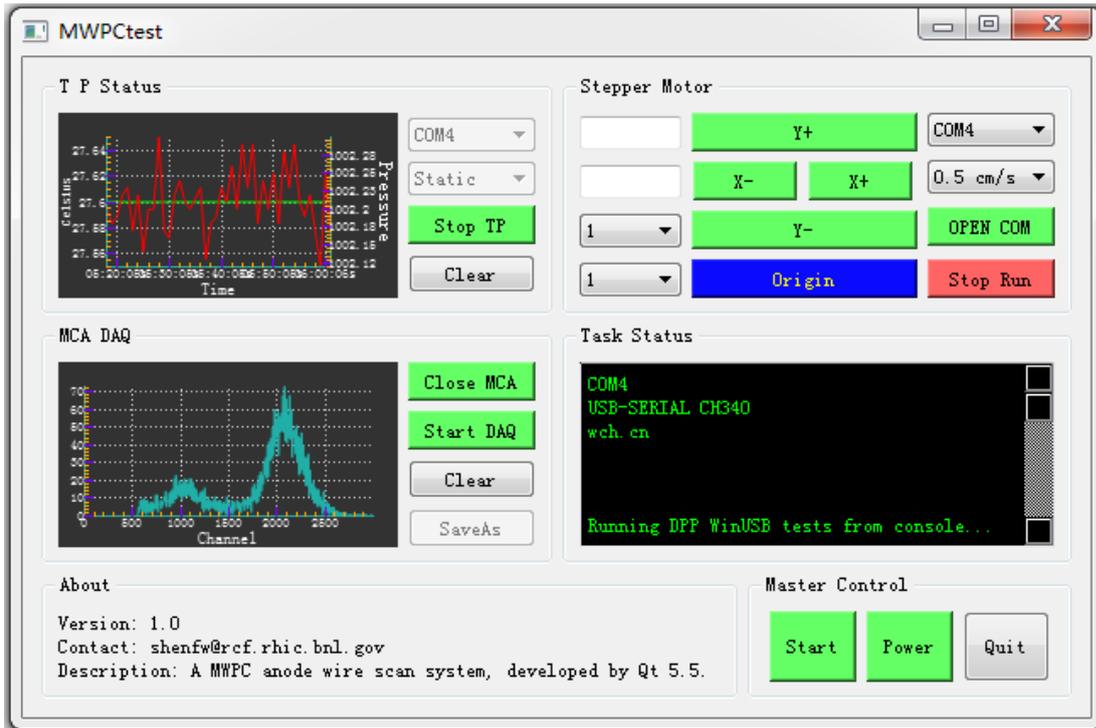


图 4.33: iTPC 多丝室自动测试系统软件截图

如果系统不在探测器测试状态，想调试控制软件或者是单独查看某一硬件的信息，又或者想单独进行步进电机步进的话，则需要自行进行硬件操作，比如对步进电机的控制，首先需要选择步进电机所在的串口名称；其次打开串口，设定运行的速度；选择要运行的轴或者是方向，如果想把步进导轨归零，则只需点击”Origin”按钮，则步进系统会自动归零(第一根阳极丝的第一个扫描点)。最后，如果情况紧急或者是根据需要，可通过点击”Stop Run”来实现对步进系统的紧急停止。

要查看或者是保存测试箱内的温度压强数据的话，选择温度压力传感器的微控制器所在串口名称。然后选择其可视化的方式，“Static”代表静态显示，数据不会随着时间轴移动，只会叠加。“Dynamic”代表动态显示，即数据会随着时间轴实时刷新。另外，只要该传感器的微控制器被打开，则温度压强数据会被自动保存到的txt文件中。

对于“MCA”的控制，需要首先启动 MCA，然后根据需要启动 MCA 的数据获取功能，其中能谱会时时刷新并自动编号保存为 .mca 文件。若要清除屏幕图像，点击”Clear”按钮即可。最后，如果点击软件的”Quit”按钮，则整个系统进程会停止并退出。

4.4 小结

本章主要介绍了如何搭建 X 射线测试系统，如何利用相关装置实现测试系统所需的功能。具体的，因 iTPC 多丝室主要的功能是探测高能粒子在 TPC 内的能损及径迹投影，所以需要能量确定的放射源来对 iTPC 多丝室进行增益及均匀性扫描。测试方案是采用高能物理测试中常用的 ^{55}Fe 发射的 5.9keV X 射线来对探测器进行增益扫描测试，测试气体采用与 STAR TPC 相同的工作气体-P10。为了监控气体状态对增益的影响，采用温度压强传感器模块对 P10 气体进行状态监控。因整个 iTPC 多丝室的横向跨度比较大，所以采用一个二维步进系统来移动射线源，保证 X 射线能够覆盖整个多丝室丝面。因为整个多丝室共有 160 阳极丝，可读取信号的有 157 根，但每根需要测试 3 个位置，这样对一个多丝室来说，共有 471 个位置需要进行增益测试。因为这涉及到巨大的工作量，所以又在测试系统的基础上，利用继电器阵列、移位寄存器、单片机设计并制作了一自动化测试系统，并为了方便地使用该系统，编写了相应的控制软件。相关章节详述了相关硬件的连接及功能实现方法。

第五章 iTPC 多丝室性能测试

前面提到，对于 TPC 内的多丝室来说，能够精确地还原对撞后产生的高能粒子在 TPC 气体中的能损是 TPC 发挥其鉴别粒子功能的关键。所以对于丝室的增益放大、正比性、能量分辨、相关影响因素以及多丝室性能均匀性的研究是多丝室性能测试的重点。本章主要介绍的内容有：测试系统电子学标定；丝室增益、能量分辨测量；增益影响因子如射线频率、气体状态的研究；多丝室性能均匀性扫描；最后介绍多丝室的强辐照测试。

5.1 丝端信号特征及读出

5.1.1 丝端信号特征

多丝正比室的阳极丝信号与正比计数器的信号产生原理及相关特征类似，都是电子在丝端附近产生雪崩，然后在电子-离子的运动下产生信号脉冲，阳极丝上探测到的是正信号，而在阴极丝以及 Pad 读出板上测到的是负信号。如图 5.1a 为多丝室信号产生等效原理图，b 为信号脉冲示意图，c 为信号积分示意图。对于多丝室内产生的(微分)信号来说,设该脉冲电流为 i ，则此次雪崩所产生的电荷总数为 [65]：

$$Q_s = \int_0^t i dt \quad (5.1)$$

式中， t 为信号持续时间。设多丝室内某根丝的电容为 C_{wire} ，读出电路板负载电容为 C_{out} 。则由静电学的基本原理有：

$$\begin{aligned} Q_s &= Q_{wire} + Q_{out} \\ \frac{Q_{wire}}{Q_{out}} &= \frac{C_{wire}}{C_{out}} \end{aligned} \quad (5.2)$$

式中 Q_{wire} 和 Q_{out} 分别为丝端和输出部分的电荷量，且有信号积分幅值为：

$$V_s = \frac{Q_s}{C_{wire} + C_{out}} \quad (5.3)$$

可见测量到的电量与探测器电容和输出电容之比相关，输出电容越大，测量得到的电量越接近于雪崩产生的电量。另外，测量得到的积分幅值与系统总的电容相关，总的电容越大，积分幅值越小，相应的噪音也会变大。所以在设计丝室工作电路的时候，要充分考虑到各因素给信号带来的影响，比如负载电容要足够大才能相对完整地吸收信号产生的电荷，即要有足够大时间常数或电量动

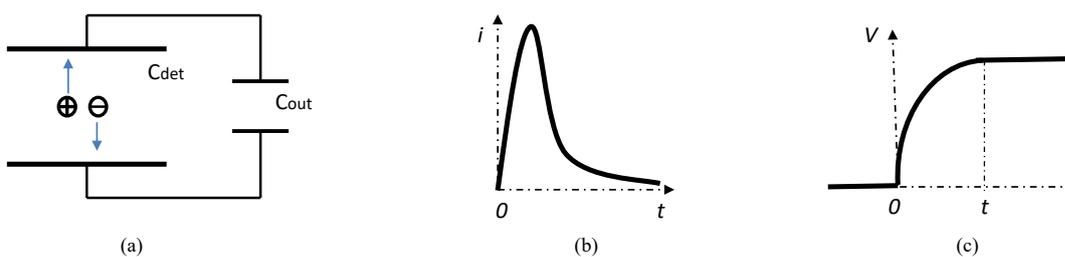


图 5.1: a 多丝正比室信号产生机制; b 微分信号及信号积分示意图

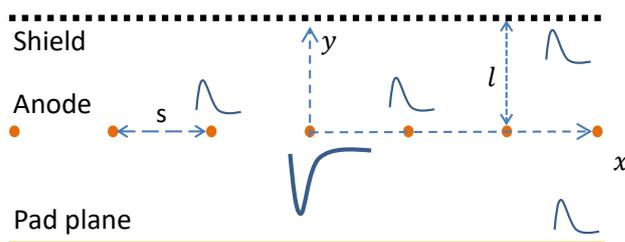


图 5.2: 多丝室结构及信号相关特征

态范围; 但又考虑到负载电容会增加整个系统电路的电容, 使得积分信号幅值变小, 同时又会增加电路噪音, 所以该值要设计在一个合理的范围之内。

图 5.2 为多丝室信号特征及其在电极上的相应分布。对于多丝正比室来说, 因其丝面结构原因, 在某些几何条件下的丝室, 其负信号丝的相邻两根丝上产生幅度相对较小的正信号。对于丝端微分信号的理论计算, 因丝端附近的电场计算比较复杂, 信号脉冲只能在丝端同轴区附近得到一近似解 [66], 有:

$$\begin{aligned}
 q_a(t) &= -q_0 C \ln(1 + t/t_0) \\
 C &= 1/\ln(r_c/r_a)^2 \\
 r_c &\equiv (s/2\pi)e^{\pi l/s} \\
 t_0 &= r_a^2/4\mu CV_a
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

式中 r_c 、 r_a 、 l 、 s 、 V_a 、 μ 分别为等效阴极半径、阳极丝半径、阳极阴极间距、阳极丝间距、阳极丝电压以及阳离子迁移率。对于 iTPC 多丝室来说, 阳极丝单位长度的电容值可用下式计算 [66]:

$$C_1 = 4\pi\varepsilon/\ln(r_c/r_a)^2 \tag{5.5}$$

式中, ε 为静电真空常数, 计算得到的 iTPC 多丝室阳极丝单位长度的电容为 9.7pF/m。且已知信号读出板 ABDB 输出电容为 1000pF, 对于 ^{55}Fe 5.9keV X 射线, 根据前面的模拟结果, 设其原初电离的电子-离子对数为 222 个, 雪崩放

大倍数为2477，则阳极丝工作在 1120V 下时，其产生的电荷约为

$$Q = 222 \times 2477 \times 1.602 \times 10^{-19} = 0.088pC \quad (5.6)$$

则在没有放大的情况下，由式 5.3可得其积分幅值为0.087mv。可见此值非常小，对于实时微分信号来说，其示波器显示幅值会更小，在该电压下示波器也不能看到。

5.1.2 丝端电路及信号读出

丝端电路是探测器稳定工作以及获得理想信号的关键，在基本的丝室快信号读出电路的基础上，针对 iTPC 多丝室特有的丝室参数等，STAR 设计了其特有的多丝室供电及读出电路，其等效电路如图 5.3红色部分。其中前1nF 电容用来滤除电源高频噪音，上拉10M 电阻用来稳定丝端电压，接地10M电阻用来稳定读出电容极板电势以及信号脉冲的基线。如上一节所述，探测器单根丝电容为 $C_L = 9.7 \times L$ pF，其中 L 为丝长，外接 1nF(1000pF) 读出电容。由式 5.3 知道丝端积分信号幅值与系统电容成反比，则有阳极丝越长则积分信号幅值相对越低。iTPC 多丝室阳极丝长度 $< 70cm$ ，阳极丝电容占比 $< 0.7\%$ 对积分信号幅值影响不大，亦即多丝室结构造成的信号本身不均性 $< 0.7\%$ 。利用示波

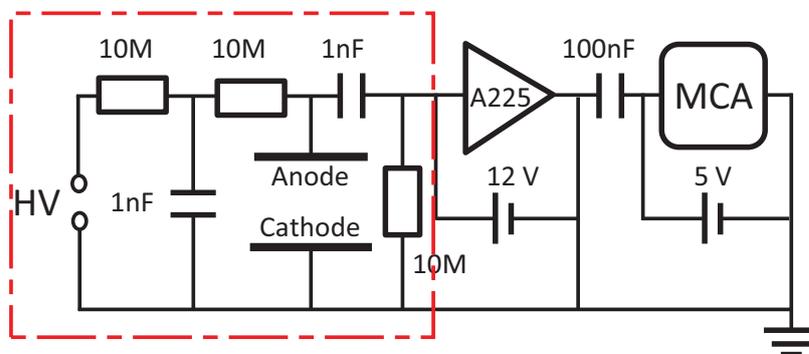


图 5.3: iTPC 多丝室单根阳极供电及读出电路等效示意图

器进行丝端信号读出，是检验探测器正常工作与否最直观的方法，不仅可以查看有无信号产生，而且可以检查有无明显的噪音本底以及外界干扰，是信号读出系统连接以及抗干扰能力最直观的检验。前面提到，多丝室阳极丝在工作电压1120V 下信号幅度太小，导致不能利用示波器进行信号检查，只有当电压加到适当的幅值之后，在示波器端才能看到幅值适中的脉冲信号。图 5.4显示的在阳极电压1320V 下的单根阳极丝的信号，脉冲幅值 $< 2mv$ ，对于雪崩出的大量的电子和离子来说，电子漂移因为受到的电场的影

电子和离子的不均衡运动导致了一开始信号的急速变化，当电子被完全吸收之后，可见信号还拖着比较长的尾巴，这一部分正是正离子 Ar^+ 在丝室电场的漂移下造成的。

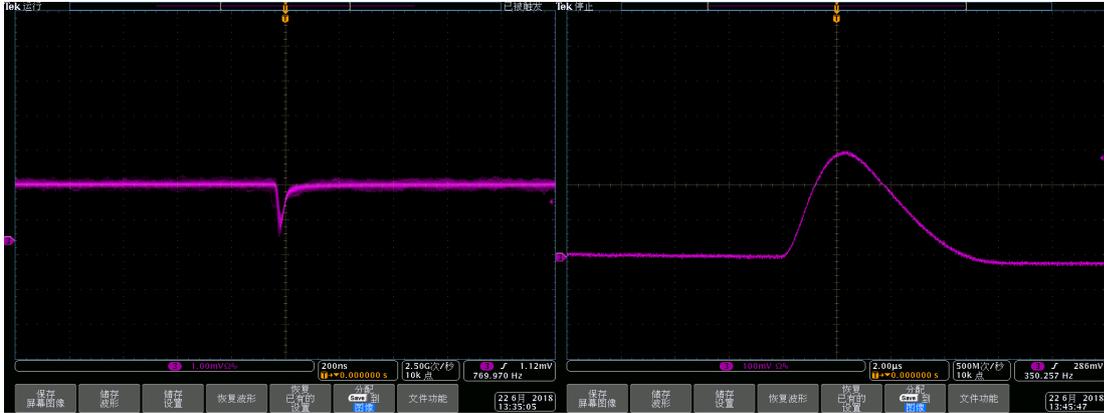


图 5.4: 左为iTPC 多丝室单根阳极丝在电压 1320V 下的脉冲信号；右为经过电荷灵敏放大器放大成形后的阳极丝信号脉冲

鉴于 1120V 丝端信号非常小，所以对工作电压下的信号获取需要一款放大倍数较大的放大器，同时为了获得足够大的信号区间，从前端放大、成形到 ADC 的相关参数都要考虑进来。电荷灵敏前置放大器因其良好的低噪音、高分辨的性能，在各种半导体谱仪及气体探测器测试中被广泛使用。图 5.5 是电荷灵敏前置放大器的工作原理图。设 Q_s 为雪崩电荷，有 $Q_s = \int_0^t i dt$ ，电路系统

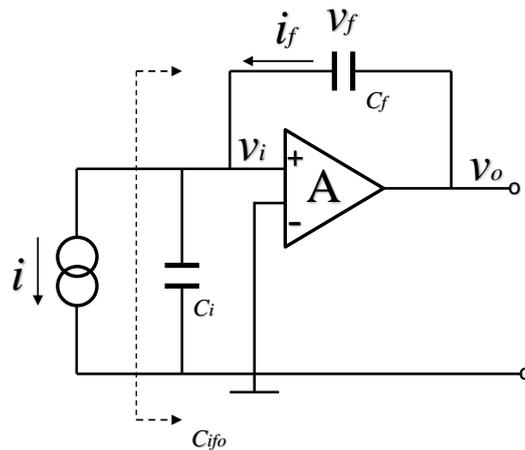


图 5.5: 电荷灵敏前置放大器工作原理图。

电容为:

$$C_{ifo} = C_i + (1 + A_o)C_f \quad (5.7)$$

式中, C_i 为探测器电容, C_f 为反馈电容, A_o 为开环放大倍数, 则有其输出幅值为:

$$V_o = \frac{A_o Q_s}{C_{ifo}} = \frac{A_o Q_s}{C_i + (1 + A_o) C_f} \quad (5.8)$$

由前面的分析知, 实际上 C_i 很小只有几 pF, 而 A_o 则有几千, 则上式可以简化为:

$$V_o \approx \frac{Q_s}{C_f} \quad (5.9)$$

反馈电容可以足够稳定, 则有输出幅值正比于雪崩电荷, 不受探测器电容的影响, 正是鉴于这一特点被称为电荷灵敏前置放大器。由 Amptek A225 灵敏度可以得到多丝室在工作电压 1120V 下经过放大成形之后的幅值为 $5.2 \times 0.088 \times 1000 = 457.6 \text{mV}$ 。图 5.4 右为一典型的经过 A225 放大之后的 iTPC 多丝室信号脉冲。由表格数据可知其最大放大成形幅值为 $25 - 1.25 = 23.75 \text{V}$, 亦即最大可放大 $23.75/5.2 = 4.6 \text{pC}$ 的电量信号。A225 另一输出模式“Time Pulse”, 是非成形后的信号, 其放大幅值相对较低, 其灵敏度 Sensitivity = 1.0V/pC , 1120V 下的信号放大后幅值为 88 mV, 最大可探测 23.75 pC 的探测器信号, 这是一个非常大的动态范围。信号放大问题解决之后就是放大信号的数字化, 即 ADC。对于 MCA 来说其通道的数量决定了幅值细分的精度, 一般的通道数量越多则幅值细分程度越大, 亦即精度越高。假设一信号的电量为 Q_s , 放大后幅值为 V_o , 则 MCA 对应的通道数为:

$$n = \frac{N}{V_{max}} V_o \quad (5.10)$$

式中, n 为信号对应的 MCA 数值, V_{max} 为 MCA 最大可测幅值, N 为 MCA 总的通道数量。Amptek MCA8000D 工作电压 $+4 \text{V} \sim +5.5 \text{V}$, 输入的动态范围 $V_s = 0 \sim 10 \text{V}$, 亦即来自前方和成形的放大信号幅值不能超过 10V。由此对 A225+MCA8000D 的数据获取系统来说, 放大加成形模式, 最大可获取 1.92 pC 的电量信号; “Time pulse” 模式最大可获取 10 pC 的电量信号。

5.2 前置放大器及 MCA 标定

前置放大器的灵敏度和多道分析器 MCA 的通道数量决定了一个雪崩信号对应的 ADC 数值, 但对于一个系统电路来说, 因其电气环境的变化, 该套电子学仍需要进行标定, 即给定已知的电荷信号, 得到相应的 MCA 通道数。具体的方法是: 利用信号发生器产生特定幅值的方波信号, 然后输入到 PC25 电路板自带的测试接口。该接口内含有一 $C_t = 2 \text{pF}$ 的测试电容, 则输入电荷为 $Q_i = V_i \times C_t$ 。假设 MCA 对应的通道为 n , 则可根据不同那个幅值下的通道数得到输入电量 Q_i 与 MCA 输出通道 n 之间的关系。图 5.6a 为信号发生器产生

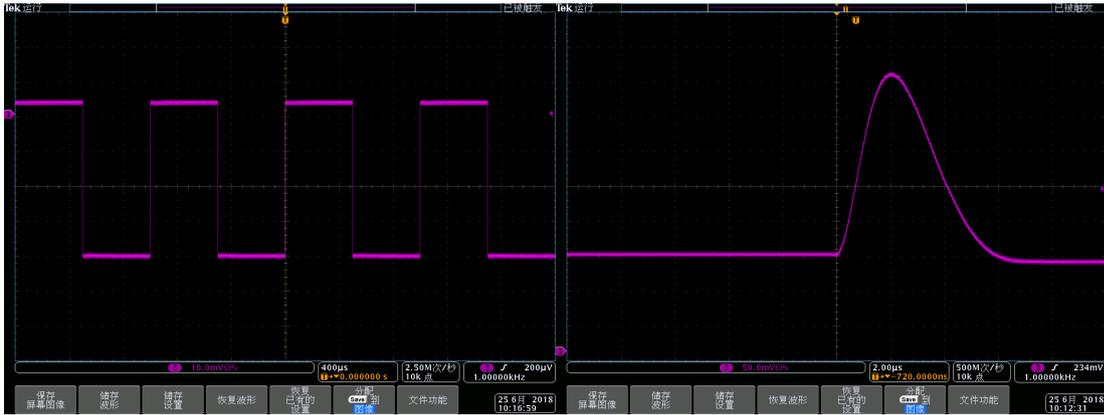


图 5.6: a 为信号发生器产生的方波信号，信号产生频率设定为1kHz；b 为方波信号经电荷灵敏放大器放大成形后的波形显示

的方波信号，图 5.6b 为方波信号经过 Amptek A225 以及 PC25 电路板测试通道放大成形后的脉冲显示。在标定的时候特别要注意的是，输入幅值与 MCA 输出通道的正比性问题。因为当输入信号频率太快的时候，因测试电容本身的时间常数问题，会导致充电的不完整，就会导致输入幅值与 MCA 输出不成正比的问题，所以标定的时候输入频率尽量要低。图 5.7a 显示的是电量在 0.04pC 时 MCA 输出的通道分布，电量分辨为：0.5%。图 5.7b 标定之后得到的输入电量 Q_i 与 MCA 输出通道 n 的线性关系，即

$$n = 5160Q_i + 53.93 \quad (5.11)$$

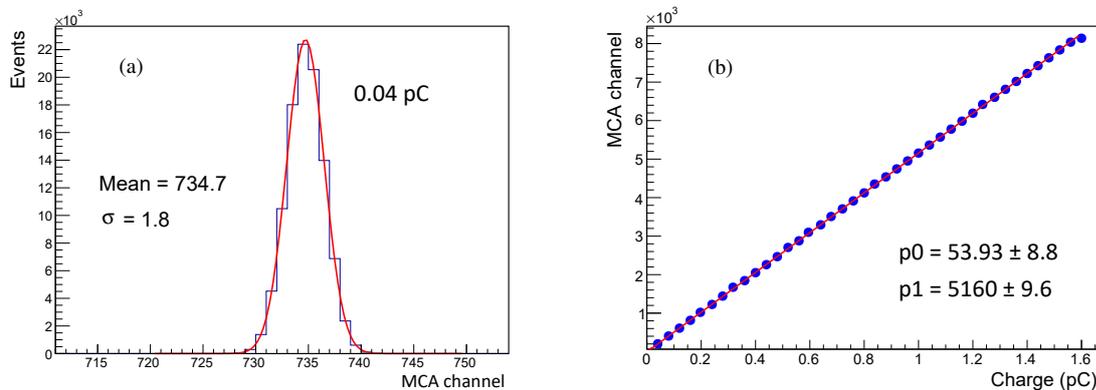


图 5.7: a 为输入电量为 0.04pC 下对应的 MCA 通道分布；b 为标定之后得到的输入电量与 MCA 通道的线性关系

5.3 iTPC 电压扫描

在电子学经过标定之后，我们便可以通过得到的 MCA 能谱来分析探测器在相应的工作电压下的增益和能量分辨。图 5.8a 为得到的 1120V 电压下的 ^{55}Fe 能谱图，拟合全能峰得到的能量分辨为 19.0%。对探测器进行电压扫描是验证探测器是否工作在正比区，及其正比性是否可预测的最直接的方法。图 5.8b (1) 是电压增益扫描结果，其中红点为全能峰拟合数据，而蓝色方点为逃逸峰拟合数据。多丝正比室增益 G 随电压的变化一般可由 Diethorn [67] 公式给出：

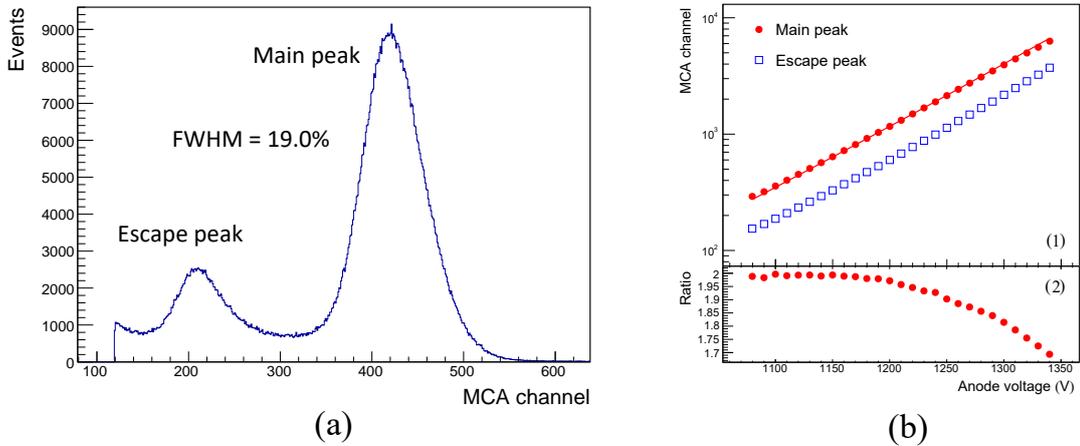


图 5.8: a 不同电压的阳极增益扫描；b 为全能峰和逃逸峰在不同电压下对应的 MCA 通道之比

$$\ln G = \frac{CV \ln 2}{2\pi\epsilon_0 \Delta V} \ln \frac{CV}{2\pi\epsilon_0 E_{min}(\rho/\rho_0)} \quad (5.12)$$

式中， V 是阳极丝工作电压， ϵ_0 是真空静电常数， C 为阳极丝单位长度的电容， E_{min} 是雪崩发生的临界电场强度， ΔV 是产生次级电子-离子对需要的平均电势。 ρ/ρ_0 是实时气体密度与标准状态下气体密度之比。其中参数 E_{min} 和 ΔV 都是依赖于气体的参数，且该参数可通过电压扫描的数据得到，具体方法可参见 [68]。通过该方法得到的 $E_{min} = 44.2 \pm 0.5 \text{ kV/cm}$ ， $\Delta V = 23.5 \pm 0.2 \text{ V}$ 。根据 iTPC 多丝室阳极丝单位长度的电容等参数则可得到确定参数的 Diethorn 公式，由该公式可预测正比区相应电压的增益。图 5.8b (1) 中的红线即为由得到的 Diethorn 公式给出的增益预测，可见其与测量值能有一个较好的符合。

图 5.8b (2) 为全能峰与逃逸峰峰位之比，从全能峰与逃逸峰的产生机理以及能量比值上来说，该值应该为一常数，但是可以看到，随着电压的升高，该值在不断降低。这是因为随着电压的升高，雪崩产生的空间电荷越来越多，大量的阳离子的产生会导致在阳极丝与阴极之间产生一个等效的压降，该压降会

导致增益偏低。雪崩产生的电荷越多，压降效应越明显，因为全能峰产生的电荷较逃逸峰多，其产生的压降更为明显一些，该现象也被称为雪崩过程中的空间电荷自感应压降效应 [69]。进一步说随着电压的升高，全能峰信号产生的增益较逃逸峰的越来越小，两峰峰位之比逐渐降低，当电压达到某个值的时候两峰之比则变为1，也就是信号产生的电量不再依赖于原初电离的电子-离子对数，丝室进入相对饱和区。通过雪崩放大的微观机制，以及相应的假设，可以建立

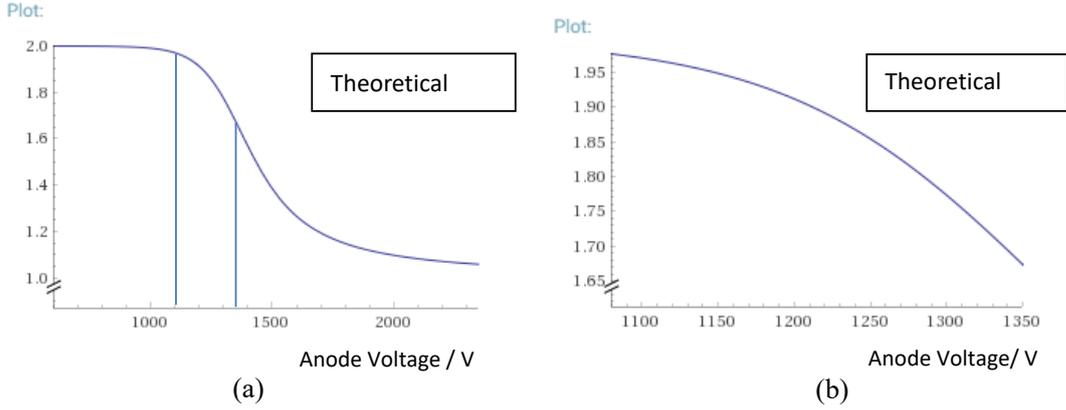


图 5.9: a 模型对两峰之比随电压变化的预测；b 左图，竖线区间内图形放大，即对应实验电压区间内两峰峰值之比的变化

一定量的自感应压降模型。由雪崩放大的原理机制，增益可表示为：

$$G = 2^N = 2^{\frac{\Phi(ra) - \Phi(rc)}{\Delta V}} = 2^{\frac{\Delta\Phi}{\Delta V}} \quad (5.13)$$

式中， G 是增益， N 是原初电子雪崩过程中电离的代次， $\Phi(ra)$ 、 $\Phi(rc)$ 分别为阳极丝表面的电势和引发雪崩处的电势。 ΔV 是产生一个次级电子所需的平均电势差。该过程中产生的空间电荷会产生一个等效的压降 $\delta\Phi$ ，则增益修正为：

$$G = 2^{\frac{\Delta\Phi - \delta\Phi}{\Delta V}} \quad (5.14)$$

假设压降 $\delta\Phi$ 正比于雪崩过程中产生的电子个数 n ，即：

$$\delta\Phi = \alpha n G \quad (5.15)$$

式中， α 为比例系数，则增益进一步表示为：

$$G = 2^{\frac{\Delta\Phi - \alpha n G}{\Delta V}} = \frac{2^{\frac{\Delta\Phi}{\Delta V}}}{2^{\frac{\alpha n G}{\Delta V}}} = \frac{G_0}{\beta^G} \quad (5.16)$$

$$G_0 = G\beta^G$$

通过 *Mathematica* 解得上式有：

$$G = \frac{W(G_0 \ln \beta)}{\ln \beta} \quad (5.17)$$

式中， $W()$ 为 *Mathematica* 特有函数，称为 "ProductLog()"。对于 ^{55}Fe X 射线来说，全能峰对应的原初电离的电子个数为 222，逃逸峰约对应 100~110 个，亦即原初电离的电子个数之比约为 2，即 $n_{main} = 2n_{esc}$ ，则有 $\beta_{main} = \beta_{esc}^2$ 。则全能峰与逃逸峰的峰位之比为：

$$\begin{aligned} \frac{2G_{main}}{G_{esc}} &= \frac{2W(G_0 \ln \beta_{main})}{\ln \beta_{main}} \times \frac{\ln \beta_{esc}}{W(G_0 \ln \beta_{esc})} \\ &= \frac{W(2G_0 \ln \beta_{esc})}{W(G_0 \ln \beta_{esc})} \end{aligned} \quad (5.18)$$

式中， G_0 为理想增益，通过调整压降 α 等参数的大小，可以获得与实验符合比较理想的曲线，图 5.9 显示的是方程 5.18 预测的两峰峰值随电压的一个变化，可以发现，随着电压的升高，其比值最终无限接近于 1，多丝室相继进入饱和区。将图 5.9b 与图 5.8b (2) 相比可以发现，该模型可以较好地符合实验值。

5.4 iTPC 多丝室增益随 X 射线频率的变化

前面提到放射源为一面源，且并没有对其进行相应的聚焦操作，由第三章的模拟结果可以发现，放射源的射线产生的信号至少可以在 40 根阳极丝上产生信号。因射线在气体中的衰减以及相应的放射角度，会导致信号频率在丝平面上分布地不均匀。这中不均匀性是否会给丝端信号的幅值或者是增益带来一定的影响，需要进行相应的测试。固定放射源的位置，然后测试不同丝上的事例率，可以得到事例率在丝平面上的空间分布。图 5.10 显示的是 40 根阳极丝的事例率分布，单根丝的事例率最大为 2000。与模拟结果比较一致的是，射线所能覆盖的丝数恰好在 40 根左右。图 5.10b 显示的是不同丝得到的相对增益变化。可以看到，所测到的增益恰好与丝端的事例率成反比，这便是空间电荷效应所带来的丝端增益的变化，由该效应所带来的增益浮动在 2.7% 左右。事例率越高，相应的单位时间内空间中所产生的电荷越多，这样在丝端引起的压降效应就越明显，相应的所测增益就会偏低。关于空间电荷效应对丝室增益的影响，已经有不少的研究，像 R.W.Hendricks 最早研究的空间电荷效应在正比计数器中引起的增益降低，给出了一个比较好的理论解释，能与实验符合得较好 [70]。Ken Katagiri 建立了一个数值化的方法来计算多丝正比室中的空间电荷效应 [71]。W.Riegler 等总结了多丝正比室中一些典型的空间电荷产生模型 [72, 73, 74]。对于比较简单的空间电荷产生模型，比如空间电荷在多丝室平面上呈现均匀分布，或者是高斯分布，其产生的效应可以通过格林和泊松方程来解得。一般的，空间电荷在阳极和阴极之间产生一等效压降 δV ，该压降正比于空间电荷的密度。而空间电荷的密度又正比于单位时间内电离产生的电子-离

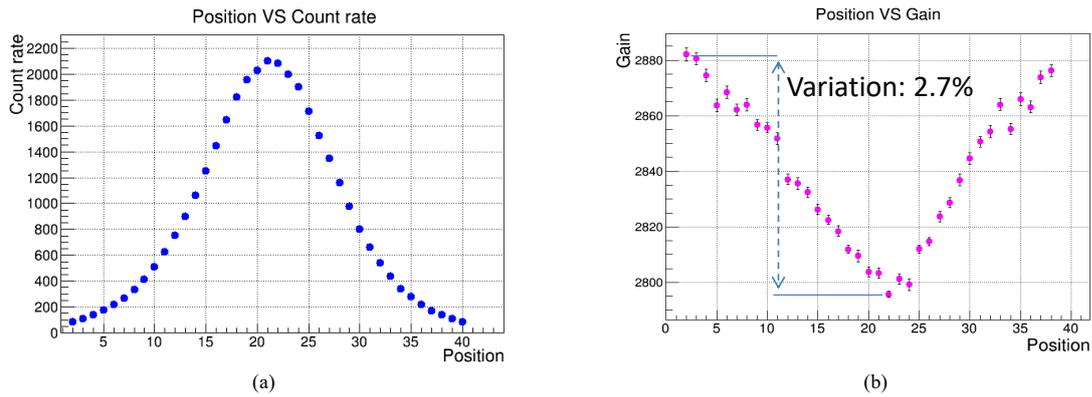


图 5.10: a 固定放射源位置，得到的放射源中心向外共40根丝的事例率变化；b 相应丝的增益分布

子对数，则有：

$$\delta V \propto \bar{R} \quad (5.19)$$

式中 \bar{R} 为平均事例率。因该等效压降 δV 是一非常小的值，所以近似线性关系有：

$$\frac{\Delta G}{G} = a\bar{R} + b \quad (5.20)$$

利用控制变量法可以得到增益变化随事例率变化的参数，即固定一根丝，通过

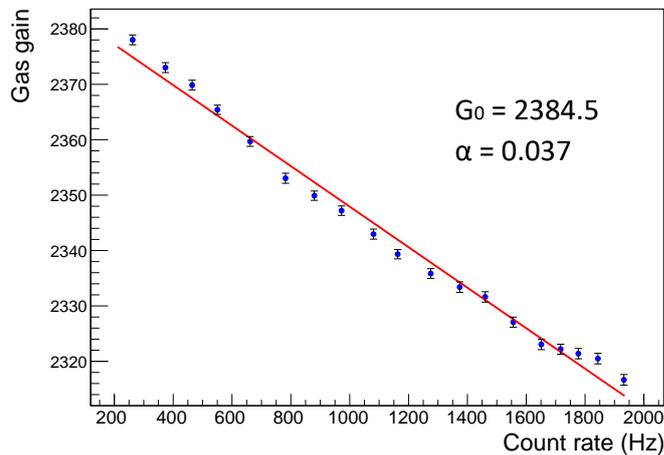


图 5.11: 多丝室增益随着 X 射线事例率变化

控制放射源距离丝的垂直距离可以控制丝端的事例率，这样就可以得到不同事例率下增益的相对变化。图 5.11 显示的单根丝增益随着 X 射线计数率的变化。根据这一参数，可在后期对整个阳极丝面进行增益均匀性扫描的时候，进行相应的修正，从而比较准确地反映增益均匀性的实际情况。

5.5 iTPC 增益随气体温度压力的变化

由 Diethorn 方程可以看到，在固定的温度下，气体增益与压强 ρ 成反比，实际上气体的增益不仅会随着气体压强的变化而变化 [75]，而且还和气体的温度有关。在我们的测试中，我们实时监控了增益测试中的温度和压力，以期获得增益与气体状态的关系。因气体的增益与气体的密度亦或气体单位体积内的分子个数 N 有关，且由热力学基本定律有：

$$PV = nRT \quad (5.21)$$

式中 P 、 V 、 n 、 R 、 T 分别为气体压强、体积、单位体积内的分子数、理想气体常数和温度。由该状态方程可知，温度越低，压强越大， N 越大。相应对增益有：

$$\frac{\Delta G}{G} = \gamma \frac{\Delta(T/P)}{T/P} + c \quad (5.22)$$

因为气体密度高，反而电子在一个平均电离自由程内所获得的能量相对较低，这就限制了雪崩在空间中的发展，导致最后的增益变低。 N 越小，反而增益相对越高。为了测试增益与温度压力关系，程序设定每 5s 获取一次测试箱内的

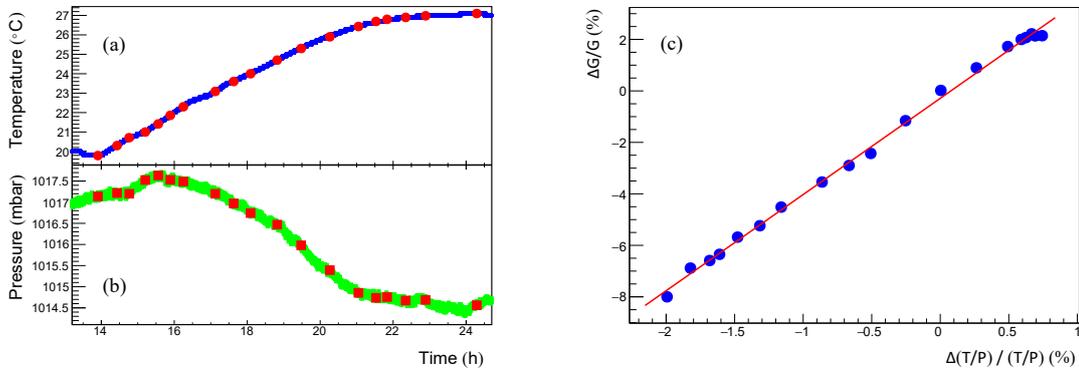


图 5.12: ab 测试箱内实时压力和温度变化；c 增益随气体压力、温度变化曲线

温度和压力数据。图 5.12ab 显示的是测试箱内 10 个小时的温度和压力数据，其中气压浮动约 3mbar，温度变化约 7°C 。图 5.12c 显示的是增益随气体压力、温度变化曲线，其中零点压力和温度取值分别为 25°C 和 1015 mbar。拟合数据点最后得到参数 $\gamma = 3.74 \pm 0.04$ ， $c = -0.29 \pm 0.04$ 。在 10 小时内，测试箱内所测得的增益浮动已经达到了 10%，已经逼近我们测试所要求的性能指标。对于多丝室的增益扫描来说，因其几何跨度较大，测量丝数较多，测量时间则相应较长，测试箱内的气体状态变化较大，这样该关系式对后期增益扫描的修正会起到至关重要的作用。

5.6 iTPC 多丝室增益均匀性扫描

对于TPC来说，端盖部分的多丝正比室是其工作的核心部件，多丝室性能的好坏直接影响到对粒子能损 dE/dx 的测量，从而影响到 TPC 对粒子的鉴别等。粒子能损的测量不仅要求多丝室拥有良好稳定的电压响应，好的正比性，还要求对于整个丝室平面来说，其增益的浮动不能太大，即多丝室平面放大要尽可能地均匀。对于每个 iTPC 多丝室平面来说，设计要求，增益均匀性即增益分布的 $RMS/Mean \leq 10\%$ 。丝室增益除了与气体本身的性质有关之外，还与探测器各结构的几何分布、机械精度有着密切的联系。对于整个阳极丝丝面来说，不仅要测量每根丝的增益，还要测量每根丝不同位置处的增益。



图 5.13: iTPC 多丝室自动测试扫描路径方案

上一章提到，探测器测试需要测试所有的阳极丝，以及对每个阳极丝还要测量 3 个不同的位置，一共 471 个扫描点。首先是扫描点的路径规划，方案一：首先扫描 Y 方向，即扫描完所有的丝，然后再在丝的其他两个位置进行两次独立的扫描，看参考图 5.13a；方案二：一次扫描完一根丝的 3 个位置，然后步步为营，直到扫描完 160 根阳极丝，可看参考图 5.13b。方案一的优点是在较短的时间内扫描完所有的丝，温度压强修正所造成的不确定性会较小；但缺点是但对于沿丝方向的 3 个不同位置，因相隔时间比较长，3 组数据会造成一定的分层。方案二的优缺点正好相反，方案二的三次测量结果对与同一根丝来说浮动不大，但在总的时间上来说，前后不同丝的测量时间差较大，会在整体上出现一个浮动。最后采用的是方案一，图 5.14a 显示的是增益在不同丝不同位置的分布；b 显示的是所有测试点的增益分布，利用高斯对该分布进行拟合，得到的增益分布 $RMS = 20.4$ ， $Mean = 2333$ ，则所得增益均匀性为 0.8%，远好于 10% 的性能要求。图 5.14cd 显示的是增益在不同丝不同位置能量分辨率(FWHM)的分布，其均值为 19.3%，亦远好于 35% 的能量分辨要求。

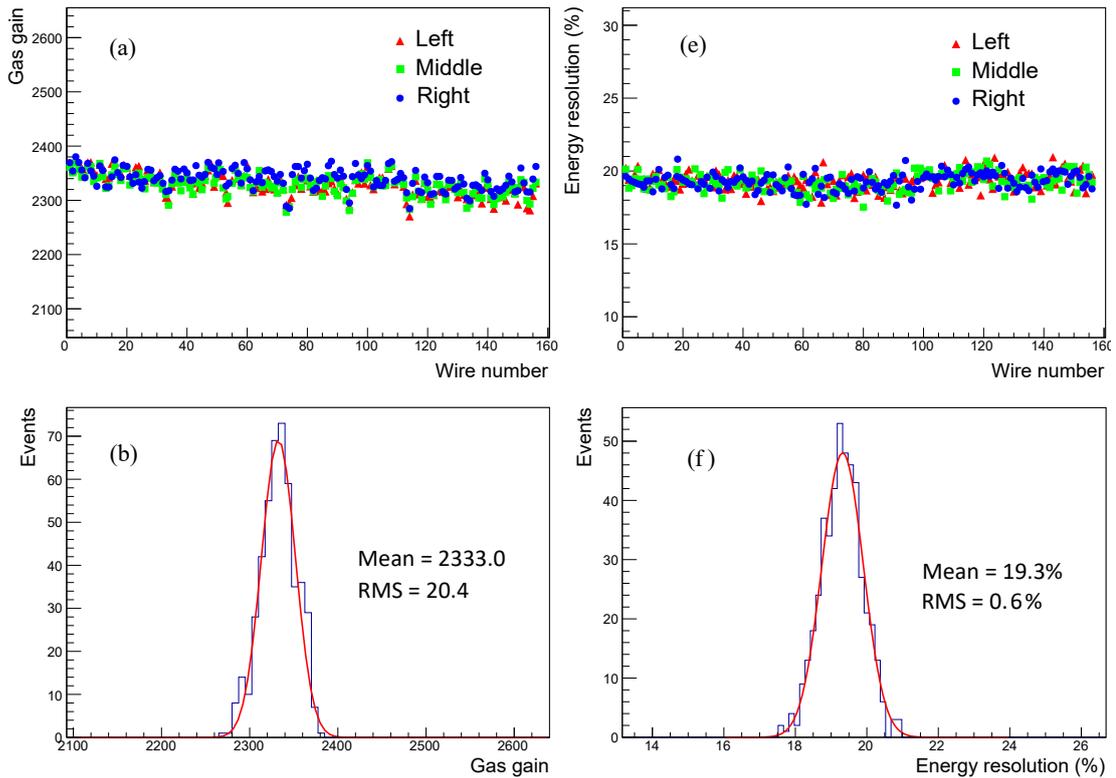


图 5.14: a 不同位置不同阳极丝的增益; b 471个测试点的增益分布; c 为不同位置不同阳极丝的能量分辨; d 为 471 个测试点的能量分辨率的分布 [32]

5.7 iTPC 强辐照测试

TPC 内的多丝室除了要满足增益及能量分辨的一些要求之外，还要保证在高亮度、高频率对撞条件下能够稳定工作。在正常的工作状态下，单位时间内有大量的电子涌入，会在丝端产生较大的持续电流，在这种情况下丝室可能会出现放电或者高压模块跳闸(Trip) 的现象，对 STAR 这样的大型实验装置来说，高压跳闸是对金钱和时间等实验资源的巨大浪费，所以在探测器安装之前，需要对其进行高能量的强辐照测试，判断其是否能够适应对撞条件的工作环境并稳定工作。

iTPC 多丝室强辐照测试使用的管压 $0 \sim 50kV$ ，管流 $0 \sim 1000\mu A$ 的 X 射线管。射线靶为铜靶，可以向外辐射铜的特征 X 射线，射线能量区间可以通过控制管电压来调整，射线最大能量可达 $50keV$ 。相应的 X 射线强度可以通过控制管电流来调整，在管压 $25kV$ ，管流 $500\mu A$ 的工作条件下，射线强度可达 $230K/s$ 。图 5.15a 显示的是利用单丝测量得到的 X 射线管在 $25kV$ 电压下的射线管能谱，可以看到该能谱也有两个明显的峰，左边为 Ar 的逃逸峰($\sim 2.9keV$)，右边为 Cu 的特征峰($\sim 8.9keV$)，最左边为数据截取边界，将低能及噪音部分去掉了。图 5.15b 显示的是 X 射线管在 $25kV$ ， $500\mu A$ 的工作条件下与 ^{55}Fe 事例

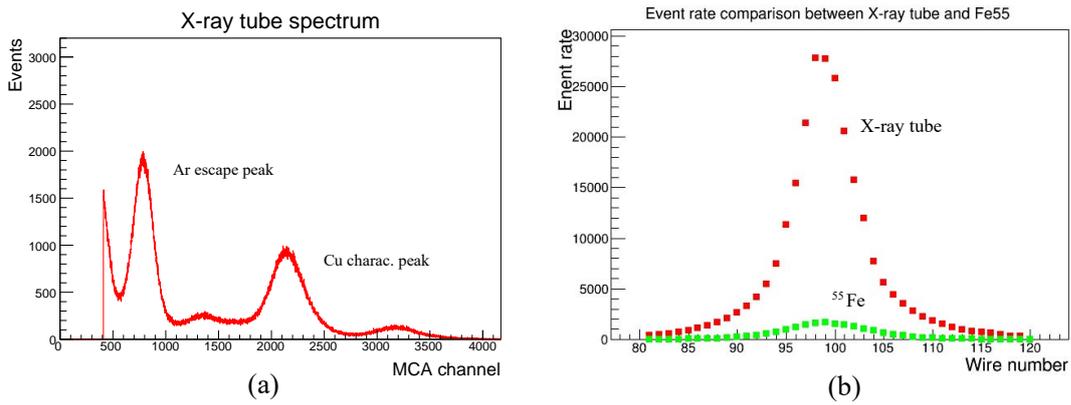


图 5.15: a iTPC 多丝室单丝测得的 X 射线管能谱; b 为 X 射线管与 ^{55}Fe 在不同丝上的事例率之比

率空间分布的对比图，可以明显看到 X 射线管的高强度特征。不管是射线强度还是射线的发射角度，都与 STAR 探测器内的束流对撞产生高能粒子喷射的方式相似。在这样高能量高强度的辐照测试下，其工作的稳定性通过探测器电流来检测，如果探测器电流在探测时间内没有较大的波动，高压模块也没有跳闸，可以认为探测器能够适应 STAR 的对撞环境。

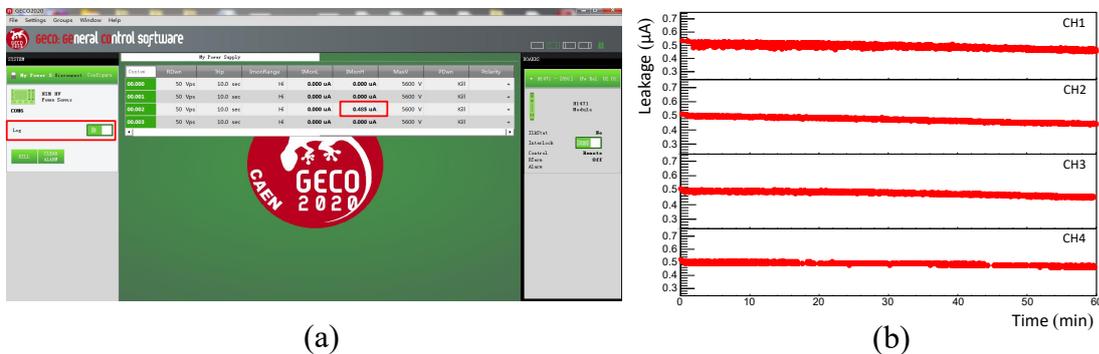


图 5.16: a CAEN 高压模块电流监控和获取软件GECO2020软件截图; b 整个探测器，4 个高压通道电流在一个小时内的变化

探测器电流的测试方法是，利用 CAEN 电源插件控制软件 CECO 2020 来监控和读取探测器电流。通过 USB 连接计算机与高压插件 CAEN1471，开启“Log”模式即可自动读取所有通道的电流和电压数据。探测器一共有 4 个高压通道，每个通道可以覆盖 40 根丝，而通过 5.15b 可以看到，射线管发射的射线恰好能覆盖40根丝，即一个高压通道，所以对于整个探测器的强辐照测试来说，4 个通道需要一一测试。图 5.16a 显示的是探测器强辐照测试所用的电流监控及数据获取软件 GECO 2020 工作状态下的截图。图 5.16b 显示的探测器4个高压通道在强辐照测试下的电流随时间的变化，每个通道的电流达到了 500nA，

这与对撞环境下所得到的探测器电流大小一致。在一个小时的强辐照测试下，探测器电流并没有出现较大幅度的波动，也没有出现高压模块跳闸的情况。因射线管随着工作时间的增加，靶温温度会逐渐升高，造成射线的产生效率会出现一定的下降，从图中可以看到探测器电流随着时间的增加出现相应的下降。

5.8 STAR Run18 运行测试

2017/08/05 一个制作完成的 iTPC 探测器被成功安装到 STAR 探测器上，且在 STAR Run18 的重核对撞($\sqrt{NN}=200\text{GeV}$)实验中进行了相关的测试。利用该探测器的束流测试数据，对升级的电子学及其相应的算法(比如 Cluster Finder)进行了相应的测试和改进。目前该探测器工作稳定，在一定程度上提升了 TPC 的性能。图 5.17显示的是，TPC 端盖部分的径迹投影，可以看到安装

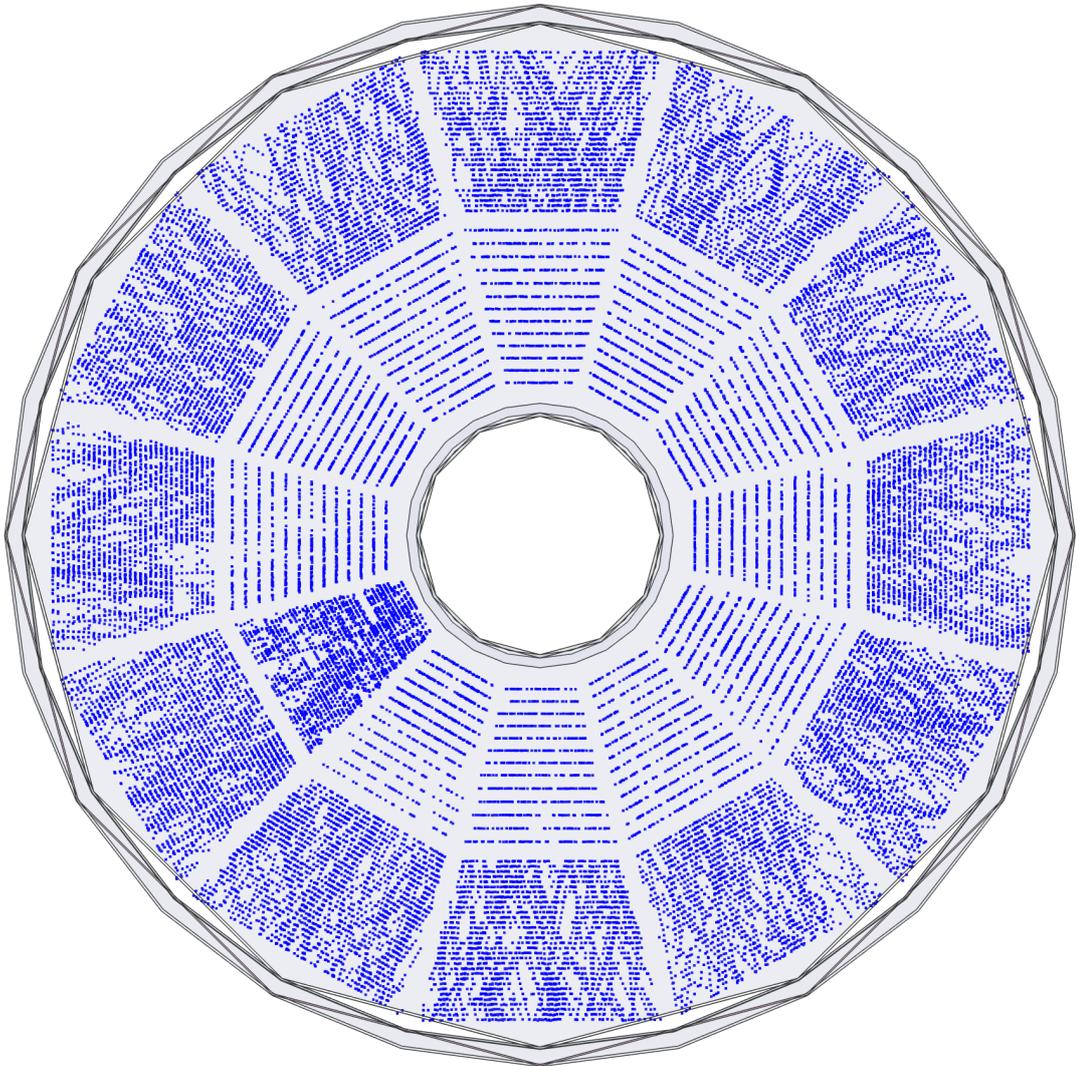


图 5.17: TPC 端盖径迹投影

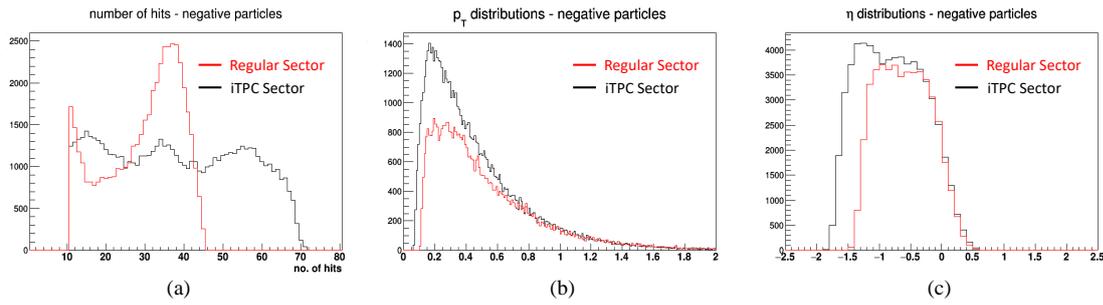


图 5.18: 升级后的iTPC安装到 TPC 上之后, 相关的性能变化

上的 iTPC 探测器, 其径迹密度较没有升级的部分大了许多, 形成了鲜明的对比。图 5.18 显示的是安装升级后的 iTPC 探测器后, 相应的 TPC Sector 的性能对比, 可以明显地看到, 在有 iTPC Sector 的地方其径迹上打击点的数量、在大快度以及低横动量粒子的接受度和探测能力都有所提升, 比如低横动量粒子探测的动量阈值降至 60 Mev/c, 以快度为单位的接受度从 $\eta=-1.5$ 扩展到了 $\eta=-1.9$ 等。

5.9 小结

本章通过对 iTPC 探测器的测试, 研究了探测器增益随阳极电压、X 射线计数率、气体的温度压强的关系, 并扫描了整个探测器丝面的增益均匀性。测试得到探测器增益均匀性 $RMS/Mean < 1\%$, 能量分辨为 20%, 均好于性能设计要求。在 230k/s 高强度 X 射线的辐照测试下, 探测器电流达到了 500nA, 与 STAR 对撞环境下的工作电流大小较为一致, 且探测器能够稳定地工作, 没有出现电流大幅度的波动和电压模块跳闸的情况。一制作完成并通过测试的 iTPC 探测器于 2017/08/05 安装到 STAR TPC 上, 进行了一些运行测试和相关调试工作, 其工作稳定, 且测试结果显示其在很大程度上提高了 TPC 的接收度和探测能力。综合以上, iTPC 升级中所制作的探测器性能符合设计预期。

第六章 总结与展望

6.1 总结

基于对强相互作用的研究和对量子色动力学的实验验证,人们通过高能重离子(如: Au+Au, Pb+Pb)的碰撞实验来研究高温高密状态的物质形态变化。这其中会产生一种夸克解禁闭的夸克胶子等离子态(QGP),对QGP及不同的高温高密的物质状态的研究不仅有利于我们对强相互作用的理解和相关的理论验证,还有利于我们对早期宇宙的演化、大质量形体内部物质形态的理解。RHIC正是设计用来专门进行重离子碰撞的对撞机,STAR是RHIC上的一个非常重要的探测器,该探测器结构紧凑,功能丰富,可以追踪对撞中产生的大部分高能带电粒子。基于对夸克胶子等离子(QGP)性质及QCD相图的研究,RHIC在2010~2014进行了一期的能量扫描(BES-I),对QCD相图轮廓的绘制及QCD的相变临界点的寻找提供了关键的实验信息。并计划在2019~2020进行二期的能量扫描(BES-II),并在能量扫描之前计划对相关的探测器进行相应的升级,其中作为STAR探测器的核心部件STAR TPC正是这次升级的重点。此次升级的主要目的是,期望能够提高TPC在大快度区域的接收度,提高粒子鉴别的能力;提高对低横动量粒子的探测能力。TPC的端盖共分成24块,由内外两层的多丝室及相应的读出系统组成的。其中内层丝室的探测能力和接受度较低,这次升级主要针对的就是内层丝室部分即iTPC的升级。具体的,(1)将iTPC的读出板Pad plane的覆盖率,从原来的20%提高到100%;(2)更换三层丝面;(3)升级相应的前端电子学,读出通道比原来增加一倍。

山东大学负责对iTPC多丝室的制作及性能测试,山东大学高能物理实验室凭借专业全面的设备,可实现对iTPC多丝室的批量制作及测试。其中绕丝系统可以绕制特定张力和间距的丝面,丝张力及丝间距测试系统可以测试丝框和制作好的多丝室丝面的丝张力及丝间距,对丝室的质量控制起到了不可替代的作用。而落丝系统能够将丝框丝面按照特定的机械尺寸及精度要求落到相应的丝室挂载上。因为整个丝室的制作步骤繁琐,且涉及到很多不同的工程问题,比如:张力、间距控制;张力、间距测量;丝面高度控制、间距梳理;丝位的显微检查;丝面的连通性、短路断路检查等等。所以根据相应的样机制作经验,设计并总结了一套流程化并能够实现质量控制的工艺体系。凭借这一体系及相应的专业设备,目前已经生产并测试通过了过半数的iTPC成品机。

在进行测试之前,需要对iTPC多丝室进行一个比较系统的性能研究,本文介绍了如何利用模拟软件Garfield++来实现对iTPC多丝室性能的一个系统

模拟和分析。首先是对 P10 气体性能的研究，包括电子在 P10 中的漂移速度、扩散系数、粘滞系数等进行了相应的模拟和计算；其次是 ^{55}Fe X 射线在 P10 中能损和衰减模拟，得到了 X 射线在气体中的能损分布和衰减常数。并对该射线产生的 δ 电子在 P10 中的电离和衰减做了相应的模拟。发现 5.9keV 的 X 射线在 P10 中产生的 δ 电子能够运动几百 μm 便全部损耗掉全部的能量了；第三，根据测试系统的几何布局，模拟了 5.9keV X 射线在测试箱内的电离位置分布，发现 X 的电离范围能够覆盖 ~ 40 根阳极丝，这也与之后的测试结果相符；第四，模拟计算了 iTPC 多丝室的电场强度。第五，模拟了电子在丝室阳极丝上的雪崩，得到了不同电压下的电子雪崩能谱分布，与实验值相比符合较好。

iTPC 的测试系统是一基于 X 射线及 P10 气体环境的探测装置。根据 iTPC Sector 的相关尺寸及密封要求，设计并制作了密封性极好的 X 射线测试箱；因整个丝室的跨度比较大，所以利用二维步进系统实现放射源的移动；考虑到气体环境的状态会影响丝室增益，利用温度压力传感器模块对测试箱内的气体温度和压强进行实时监控并记录；iTPC 在 1120V 的阳极工作电压下的增益及脉冲幅度极小，利用电荷灵敏放大器加成形进行丝端信号的放大，模数转换利用 MCA 来实现并进行相应的数据采集。因考虑到整个丝室的增益扫描的任务艰巨，设计并制作了多丝室的自动化扫描系统。具体的，利用继电器阵列、移位寄存器及单片机实现了 160 路的信号通道选择；利用单片机、驱动器和开关电源实现了二维步进系统的控制；利用激光感应实现了步进电机位置的监控和归零操作；利用单片机和温度压力模块实现了温度、压力数据的自动采集；利用 Amptek MCA 的程序开发包，实现了计算机与 MCA 的自定义通信与数据采集；最后利用 Qt 将所有的部件进行多进程整合，编写了相应的 GUI 方便对整个测试系统的友好化控制和相应的数据可视化。

利用相关设备对探测器做了一个相对完整的性能研究和测试，具体的：利用示波器观察了 1340V 下的阳极丝信号；利用信号发生器对 Amptek 225 和 MCA 进行了相应的电量-通道标定；研究了丝室增益随电压的正比性变化；研究了不同电压下的空间电荷效应对不同能量的射线能谱影响；研究了丝室增益随着射线事例率的变化；研究了丝室增益随气体温度和压强的变化。最后利用高强度的 X 射线管对多丝室进行了强辐照测试。测试结果表明丝室的增益均匀性好于 1%(RMS/Mean)、能量分辨率好于 9%(Sigma/Mean)，以上完全满足升级对多丝室性能的相关要求。

6.2 展望

目前 iTPC 制作已接近尾声，这些探测器会陆续运到布鲁克海文国家实验室，并利用专业的工具安装到 STAR 探测器上。相信在未来的一年之内，所有

的 iTPC Sector 会制作测试完成，并能够成功安装到 STAR 探测器上。通过前面的技术积累，相信升级之后的 TPC 定能如期工作且性能达到相应的设计要求。

但是升级之后的 STAR 有一关键性能仍然有待提高，虽然 RHIC 每秒对撞的频率很高，但 STAR TPC 工作时其记录数据的频率远低于此，一方面受原初电离的电子从对撞点漂移到多丝室的时间和前端电子学宽带限制，一方面针对不同的物理信号，我们只触发或者是记录感兴趣的事例。还有一个重要的影响因素就是为了抑制阳离子回流，TPC 端盖的多丝室的门极丝需要进行开关门操作，但门极丝电压升降速度较慢，导致这个过程需要耗费较多的时间，在硬件性能上直接限制了 TPC 的工作频率。所以在未来我们可以通过优化多丝室结构或者对多丝室进行第二次升级来消除这一硬件缺陷，使 TPC 的工作频率不受门极丝开关门的影响。

目前解决这一问题有三个备选方案，其一是通过模拟来优化门极丝丝面升压降压参数，以最小的操作时间获得最佳的阳离子抑制效果；第二个是在现有门极丝的基础上再交错叠加一层门极丝，也可以抑制吸收大量回流的阳离子；第三个是将多丝室的阴极丝和门极丝拆除，利用 GEM 膜做阴极和门极平面，抑制阳离子的溢出和回流。目前山东大学高能物理实验正在进行相关的模拟和实验工作，搭建了基于阳极丝放大的 GEM 混合探测器，模拟和实验的结果显示这种结构的丝室能够将阳离子回流率降低至 0.5%，能够有效抑制阳离子的回流。由于 GEM 替代了门极丝，在不用顾虑阳离子的回流的同时，又省掉了门极丝开关门所需要的升压和降压操作，解决了多丝室在硬件上对 TPC 工作频率的影响。相信经过进一步的优化和实验以及相关的可操作性论证，从中选定最佳的整改方案，从而彻底解决这一性能瓶颈，使得 STAR 的取数频率实现量级上的提升。

参考文献

- [1] Feynman Richard, 1985.ISBN 978-0-691-12575-6.
- [2] Antonio Pich, arXiv:hep-ph/9505231
- [3] F. Arsene, *et al.* (BRAHMS Collaboration), Nucl. Phys. A 757, 1 (2005)
- [4] B. B. Back, *et al.* (PHOBOS Collaboration), Nucl.Phys. A 757, 28 (2005)
- [5] J. Adams, *et al.* (STAR Collaboration), Nucl. Phys. A 757, 102 (2005)
- [6] S. S. Adcox, *et al.* (PHENIX Collaboration), Nucl. Phys. A 757, 184 (2005)
- [7] Y. Aoki, G. Endrodi, Z. Fodor, S. D. Katz and K. K. Szabo, Nature 443 (2006) 675
- [8] M. A. Stephanov, Prog. Theor. Phys. Suppl. 153 (2004) 139 [Int. J. Mod. Phys. A 20 (2005) 4387].
- [9] P. Braun-Munzinger and J. Stachel, Nature 448 (2007) 302
- [10] The STAR Collaboration, STAR Note 0598.
<https://drupal.star.bnl.gov/STAR/starnotes/public/sn0598>.
- [11] Grazyna Odyniec, Journal of Physics: Conference Series 455 (2013) 012037;
- [12] Bohr Henrik, Nielsen H.B.(1977) Nuclear Physics B.128(2):275.
- [13] M.Harrison, T.Ludlam, S.Ozaki(2003).Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.499(2-3):235.
- [14] K.H.Ackermann, *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.499(2-3):624-632
- [15] The STAR Collaboration, The STAR Conceptual Design Report, June 15, 1992, LBLPUB-5347
- [16] The STAR Collaboration, STAR Projection CDR Update, Jan. 1993, LBL-PUB-5347 Rev.

- [17] Giacomo Contin, *et al.*, Nuclear and Particle Physics Proceedings, April-June 2016, 273-275, p.1155-1159
- [18] M.Anderson, *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.499(2003)659-678
- [19] E.G.Judd, *et al.*, The evolution of the STAR Trigger System, Nucl. Instr. Meth. A(2018).
- [20] Ming Shao, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A.558(2006), 419-429
- [21] T.M Cormier, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A.483(2002), 734-746
- [22] F.Bergsma, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A.499(2003), 633-639
- [23] T.C.Huang, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A.833(2016), 88-93
- [24] A Schuttauf, STAR Collaboration, Nuclear Physics A.661(1999), 677-680
- [25] C.E.Allgower, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A.499(2003), 740-750
- [26] C.A. Whitten Jr. for the STAR Collaboration,
<http://www.star.bnl.gov/eca/LocalPol/BBCproceeding-Chuck.pdf>
- [27] The STAR Collaboration, STAR Note 0644.
<https://drupal.star.bnl.gov/STAR/starnotes/public/sn0644>.
- [28] F.Sauli(1977), Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers.
- [29] Ackermann K., Nuclear Phys. A.661(1999), p.686c
- [30] H.Bethe, J.Ashkin, Experimental Nuclear Physics,ed.E.Segre, J.Wiley, New York, 1953, P.253
- [31] S.H.I. Barboza, *et al.*, 2016 JINST 11 C02088
- [32] Fuwang Shen, *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.896(2018)90-95
- [33] Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y.(2006) IEEE Control Systems Magazine, 26(1).pp.42-54

- [34] Wang X., *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.859(2017),pp.90-94
- [35] John G.Proakis, Dimitris G.Manolakis, ISBN 978-7-121-23868-0.
- [36] R.W.Clough, J.Penzien, Dynamics of Structures, Mc-Graw Hill Inc., New York, 1975, ISBN 0-07-011392-0
- [37] Wieman H., *et al.*, IEEE Trans. Nul. Sci., 44(1997), p.671
- [38] Heinrich Schindler, Rob Veenhof, <http://garfieldpp.web.cern.ch/garfieldpp/>
- [39] S.F.Biagi, Nucl. Instr. Meth. A.421(1999), 234-240
- [40] Heinrich Schindler, *et al.*, (2012) Microscopic Simulation of Particle Detectors
- [41] H.Schindler, (2017)Garfield++ User Guide
- [42] L.Kotchenda, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A.499(2-3)(2003), 703-712
- [43] Sauli F.CERN Yellow Book 77-09
- [44] Blum W., Roland L. Particle Detection with Drift Chamber. Springer-verlag, Berlin Heidelberg, 1993
- [45] Sharma A, *et al.*, CERN-PPE/93-51
- [46] Grupen C.Particle Detector. Combridge University Press, 1996
- [47] O ahin, *et al.*, (2010) JINST 5 P05002
- [48] Townsend J. Electrons in Gases. Hatchinson, London, 1947
- [49] Peisert Anna, *et al.*, CERN Yellow Book 84-08
- [50] Palladino V, *et al.*, Nucl.Instr.Methods.(1975)128:323
- [51] Michal Gryzinski, Phys.Rev.Lett.24,45(1970)
- [52] Statistical Phycsis(2nd Edition), F.Mandl, Manchester Physics, John Wiley and Sons, 2008, ISBN 9780471915331
- [53] E Kuffel 1959 Proc. Phys. Soc. 74 297

- [54] Glenn F Knoll. Radiation Detection and Measurement, third edition 2000. John Wiley and sons, ISBN 0-471-07338-5
- [55] Korff S A. Electron and Nuclear Counters. Van Nostrand, New York, 1955
- [56] Alekssev G, *et al.*, Nucl.Instr.Mehtods, 1980, 177:385
- [57] Takeshi Watanabe, H.W.Schnopper and F.N.Cirillo, Phys. Rev. 127,2055(1962)
- [58] Georenstein, P., Gursky, H., Garmire, G., Astrophysical Journal, vol. 153, p.885
- [59] Qichao Hu, X-ray Physics - with emphasis on attenuation of X-rays in matter(2005)
- [60] F.Eggenberger, G.Polya, Uber die Statistik verketteter Vorgange, Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik 3(923)279-289.
- [61] T.Ogawa, Y.Aoki, arXiv:1701.05421V1, 2017
- [62] T.zerguerras, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A.772(2015), 76-82
- [63] Arduion introduction, <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>
- [64] bmp180 introduction, https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bmp180
- [65] Helmuth Spieler, Pulse Processing and Analysis, 2002
- [66] E.Mathieson, Induced charge distributions in proportional detectors
- [67] W.Diethorn, U.S.AEC Rep.NYO-6628, 1956
- [68] Dane E, *et al.*, Nucl.Instrum.Meth.A.572(2007), p.682
- [69] Mori C, *et al.*, Nucl.Instrum.Meth.,196(1982), pp.49-52
- [70] Hendricks R.W., Rev.Sci.Instrum., 40(1969), pp.1216-1223
- [71] Katagiri K, *et al.*, J.Plasma Fusion Res.Ser., 9(2010)
- [72] Mathieson E., Nucl.Instr.Meth.A.249(1986), p.413
- [73] Mathieson E., Smith G.C., Nucl.Instr.Meth.A.316(1992), p.246

[74] Riegler W., *et al.*, Nucl.Instrum.Methods A.582(2007), p469-473

[75] Z.Ahmed, *et al.*, 2014 JINST 9 P01009

博士期间发表的论文

- Fuwang Shen, *et al.*, MWPC prototyping and testing for STAR inner TPC upgrade, 2017 JINST 12 C06008
- Fuwang Shen, *et al.*, MWPC prototyping and performance test for the STAR inner TPC upgrade, Nucl.Instr.Meth.A.896.(2018)90-95

博士期间参加的科研工作

- 对 STAR iTPC 小型样机的宇宙线测试及数据分析
- STAR iTPC 多丝室的制作与测试
- 丝张力测试系统的标定、测试及误差分析工作
- STAR iTPC 多丝室 X 射线测试系统搭建
- STAR iTPC 多丝室性能模拟与分析

附录 A 硬件控制及通信核心代码

A.1 Arduino 控制移位寄存器及 16 路继电器

```

int clockPin = 8,latchPin = 9,dataPin = 10;
byte reset = B11111111;
void setup() {
    pinMode(clockPin,OUTPUT);
    pinMode(latchPin,OUTPUT);
    pinMode(dataPin,OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
    digitalWrite(latchPin,LOW);
    shiftOut(dataPin,clockPin,MSBFIRST,reset);
    shiftOut(dataPin,clockPin,MSBFIRST,reset);
    digitalWrite(latchPin,HIGH);
    delay(200);
    Serial.println("reset");
}
void registerWrite(int whichPin, int whichState){
    byte bitsToSend = B11111111;
    digitalWrite(latchPin,LOW);
    if(whichPin<8){
        bitWrite(bitsToSend,whichPin,whichState);
    }
    if(whichPin>7){
        whichPin = whichPin - 8;
        bitWrite(bitsToSend,whichPin,whichState);
    }
    shiftOut(dataPin,clockPin,MSBFIRST,bitsToSend);
    shiftOut(dataPin,clockPin,MSBFIRST,bitsToSend);
    digitalWrite(latchPin,HIGH);
}
void loop() {
    if(Serial.available(>0){

```

```

        int bitToSet = Serial.read() - 65; //ASCII A
            =65
        registerWrite(bitToSet, LOW);
    }
}

```

A.2 二维步进系统控制

```

void setup() {
    pinMode(5, OUTPUT); // PUL+
    pinMode(6, OUTPUT); // DIR+
    pinMode(7, OUTPUT); // ENA+
    Serial.begin(9600);
}

void Rotate(){
    digitalWrite(7, LOW); // make the stepper on line
    delayMicroseconds(50);
    for(int i=0; i<N; i++){ // N is the step number
        digitalWrite(5, HIGH);
        delayMicroseconds(500); // change the speed
        digitalWrite(5, LOW);
        delayMicroseconds(500);
    }
    digitalWrite(7, HIGH); // make the stepper off line
    delayMicroseconds(50);
}

void ChangeDIR(){
    digitalWrite(6, HIGH); // change the direction
    delayMicroseconds(50);
    for(int i=0; i<N; i++){ // rotation code}
        digitalWrite(6, LOW);
        delayMicroseconds(50);
    }
}

```

```
void loop() {//...}
```

A.3 激光开关状态获取

```
void setup() {
    pinMode(10,INPUT);// Laser pin
    pinMode(11,OUTPUT);// Enable Pin
}
void loop(){
    digitalWrite(EnablePin,digitalRead(Laser_out));
}
```

A.4 温度压强模块的数据获取

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_BMP085.h>
Adafruit_BMP085 bmp;
void setup(){
    Serial.begin(9600);
    if(!bmp.begin()){
        Serial.println("Could not find a valid BMP085
            sensor, checking wiring!");
        while(1){
            delay(10);
        }
    }
}
void loop(){
    float T = bmp.readTemperature();
    float P = (bmp.readPressure())/10.0;
```

```
...
    delay(5000);
}
```

A.5 Qt 串口通信

```
QSerialPort *Serial = new QSerialPort();
Serial->SetPortName("COM_Name");
Serial->open(QIODevice::ReadWrite());
Serial->SetBaudRate(9600);
...
Serial->close();
```

A.6 MCA 调用

```
QProcess *p = new QProcess(this);
p->start("MCA.exe");
p->write("command ");
```

A.7 数据可视化

```
//define the plot
QCustomPlot *TP = new QCustomPlot(this);
```

```

TP->addGraph();
...
connect(&tpthread, SIGNAL(SendTP_Data(QVector<
    double>)), this, SLOT(PlotTP(QVector<double>)));
void MWPCTest::PlotTP(QVector<double> y){
    ...
    TP->graph(0)->setData(x,y); //x,y is vector<
        double>
    TP->replot();
}

```

A.8 多线程实现

```

class Thread: public QThread // inherit the
    QThread function
{
    Q_OBJECT
public:
    ..
private:
    ...
}
}

```


附录 B iTPC 落丝简程

阳极丝落丝流程

- 1 高度检测: ***Straight Edge-88.54mm***、***丝梳-89.04~89.14mm***
- 2 梳齿清理、大理石台清理
- 3 阳极丝挂载上表面、焊盘和 Strong Back 背部清理检查
- 4 落丝导轨清理、牢固性检查
- 5 将探测器移到大理石台, 小心丝梳
- 6 测量 ***pad plane*** 高度-***86.55mm***,高度不能超过 ***0.025mm***。
- 7 用酒精擦净 pad plane, 并用干燥氮气吹干
- 8 检测阳极丝挂载高度, 要比 88.54mm 低 ***0.1~0.15mm***
- 9 检查阳极丝框并填写 ***Traveler-7***
- 10 丝框预安放, 保证阳极丝能够无误地落到相应的齿内
- 11 移开丝框
- 12 阳极丝挂载上表面涂薄胶, 不要湿得发亮
- 13 丝框安放
- 14 落丝到梳齿一半深度
- 15 将丝卡到丝梳直边
- 16 落丝直到接触 Straight Edge
- 17 用软刷从探测器大头向小头方向刷丝, 检查丝线是否卡落到位
- 18 和胶、涂胶, 涂胶方向为从探测器大头到小头
- 19 移开涂胶设备检测丝线是否有错位、丝上有胶体
- 20 晾干 24 小时

注意:

- (1) 阳极丝 ***164*** 根, 直径 ***20 μ m*** ;
- (2) 外侧各 ***1*** 根粗丝, 直径 ***125 μ m***
- (3) 第一根丝距离内径端 ***12.95mm***
- (4) 最后一根丝距离外径端 ***6.32mm***

阴极丝落丝流程

- 1 高度检测:***Straight Edge-90.51mm***、***丝梳-91.01~91.11mm***
- 2 梳齿清理、大理石台清理
- 3 阴极丝挂载上表面、焊盘和 Strong Back 背部清理检查
- 4 落丝导轨清理、牢固性检查
- 5 将探测器抬到大理石台, 小心丝梳
- 6 测量 ***pad plane*** 高度-***86.55mm***, 高度不能超过 ***0.025mm***
- 7 检查阳极丝、pad plane 上否有毛絮等杂物, 有则用氮气吹净
- 8 检测阴极丝挂载高度, 要比 90.51mm 低 ***0.1~0.15mm***
- 9 检查阴极丝框并填写 ***Traveler-11***
- 10 丝框预安放, 保证阴极丝能够无误地落到相应的齿内
- 11 移开丝框
- 12 阴极丝挂载上表面涂薄胶, 不能湿得发亮
- 13 丝框安放
- 14 落丝到梳齿一半深度
- 15 将丝卡到丝梳直边
- 16 落丝直到接触 Straight Edge
- 17 用软刷从探测器大头向小头方向刷丝, 检查丝线是否卡落到位
- 18 和胶、涂胶, 涂胶方向为从探测器大头到小头
- 19 移开涂胶设备检测丝线是否有错位等情况
- 20 晾干 24 小时

注意:

阴极丝 **681** 根, 直径 **75 μ m**, 大小两头各比阳极丝多两根。

门极丝落丝流程

- 1 高度检测：***Straight Edge-96.51mm***、丝梳-***97.01~97.11mm***
- 2 梳齿清理、大理石台清理
- 3 门极丝挂载上表面、焊盘 和 Strong Back 背部清理检查
- 4 落丝导轨清理、牢固性检查
- 5 将探测器抬到大理石台，小心丝梳
- 6 测量 ***pad plane*** 高度-***86.55mm***，若高度超过 ***0.025mm***，则检查接触面，并重新清理大理石台和 Strong Back 背部直至测量正确
- 7 检查 pad plane 和前两层丝线上面有无毛絮等污染物，有则氮气吹净
- 8 检测门极丝挂载高度，要比 96.51mm 低 ***0.1~0.15mm***
- 9 检查门极丝框并填写 ***Traveler-15***
- 10 丝框预安放，保证门极丝能够无误地落到相应的齿内
- 11 移开丝框
- 12 门极丝挂载上表面涂薄胶，不能湿得发亮
- 13 丝框安放
- 14 落丝但不要接触 Straight Edge
- 15 将丝卡到丝梳直边
- 16 落丝直到接触 Straight Edge
- 17 用软刷从探测器大头向小头方向刷丝，检查丝线是否卡落到位
- 18 和胶、涂胶，涂胶方向为从探测器大头到小头
- 19 移开涂胶设备检测丝线是否错位，丝上有没有胶体
- 20 晾干 24 小时

注意：

门极丝 ***681*** 根，直径 ***75μm***，空间分布与阴极丝相同