

密级_____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

大亚湾实验阻性板室探测器的研制和离线刻度

作者姓名：_____ 宁 哲 _____

指导教师：_____ 张家文 研究员 _____ 中国科学院高能物理研究所 _____

学位类别：_____ 理学博士 _____

学科专业：_____ 粒子物理与原子核物理 _____

培养单位：_____ 中国科学院高能物理研究所 _____

2013 年 5 月

The development and offline calibration
of Daya Bay resistive plate chamber detectors

By
Ning Zhe

A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of Doctor of Science

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

May, 2013

献给我亲爱的父母和未婚妻

Dedicated to my dear parents and beloved fiancée

研究生学位论文声明

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工作所取得的成果，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签名：_____日期：_____

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院高能物理研究所“关于中国科学院高能物理所研究生论文及研究成果使用权的规定”（2001）高发研生字第 315 号文件，即：高能物理研究所拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按规定提交学位论文，高能物理研究所可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，高能物理研究所可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供科研人员阅读，或在所内网站供科研人员浏览部分内容；（3）根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》，向国家图书馆等相关部门报送可以公开的学位论文。

签名：_____日期：_____

摘 要

大亚湾实验的物理目标是通过比较远近点反贝塔衰变的事例率的不同，来精确测量中微子混合矩阵中的参数 θ_{13} 。最新的测量结果表明 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.010$ (stat.) ± 0.005 (syst.)。大亚湾实验的系统误差主要来自宇宙线 μ 子产生的本底。为了减少误差，反中微子探测器被安放在地下，并设计了由水契伦柯夫探测器和阻性板室探测器组成的反符合探测器来实现 μ 子本底的扣除。

本文对阻性板室探测器的性能进行了深入研究。该探测器具有探测效率高、机械结构简单、单位造价低和易于大面积应用的特点，在大亚湾实验之前被广泛应用于高亮度高计数率实验。大亚湾实验是首次将无油阻性板室探测器应用于低计数率环境的，因此围绕这个应用本论文开展了研究。

为了确保阻性板室探测器能够成功应用于大亚湾实验，将质量控制引入裸室测试。测试结果表明阻性板室探测器的平均效率达到 95%，噪声率小于 1000 Hz/m^2 ，暗电流小于 $10 \mu\text{A/m}^2$ ，因此地面测试结果表明这些阻性板室探测器满足大亚湾实验设计指标，确保每一个模块合格之后再运往大亚湾现场。在探测器和辅助系统如高压系统、气体系统、电子学系统的安装和试运行期间，出现种种问题诸如滴水、高湿环境、打火、漏气、数据丢失，最终被成功克服，并在完成探测器和其它系统联合调试的基础上，确保探测器及时和正常的运行。

阻性板室探测器的特点是噪声大，对于这种具有低计数率特点的地下环境，如何能够准确刻度探测器的效率和噪声，是实际运行最为关注的问题。在 NuWa 框架下，成功开发了探测器的离线刻度软件包。并给出了初步结果：一号厅的 3/4 效率均值为 $(95.13 \pm 3.2)\%$ ，二号厅的 3/4 效率均值为 $(91.11 \pm 5.5)\%$ ，三号厅的 3/4 效率均值为 $(97.53 \pm 3.1)\%$ 。同时通过对探测器性能的长期监测，发现阻性板室探测器的性能持续下降的原因是阻性板室内部的垫片逐渐脱胶开扣，并且由于各层受到的压力不同，使得各层开裂的严重程度有所不同。最后从裸室生产、模块结构、安装等方面指出了阻性板室探测器需要改进的地方。

关键词：大亚湾实验、低计数率、阻性板室、宇宙线测试、试运行、离线刻度、性能下降

Abstract

The Daya Bay Reactor Neutrino Experiment aims at the precise measurement of the neutrino mixing angle θ_{13} in the neutrino mixing matrix by comparing observed Inverse Beta Decay (IBD) event rates at both near and far baselines from six nuclear reactors. The most recent result from the Daya Bay experiment is $\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.010$ (stat.) ± 0.005 (syst.). The majority of the systematic uncertainty is due to backgrounds induced by cosmic-ray muons. To minimize these uncertainties, the Antineutrino Detectors (ADs) are deployed underground with redundant muon veto systems. A muon veto system consists of a water Cherenkov pool and an resistive plate chamber (RPC) detector array.

The performance of the RPC detector is researched in this paper. The detector is featured by the high detection efficiency, simple mechanical structure, low cost and large area application of convenience. The bakelite RPCs without oil in Daya Bay experiment are first applied in low counting rate environment, so this paper has done some researches about this. For ensuring the successful application, quality control was introduced into the bare chamber test. The test result indicates that the mean of efficiencies is 95%, the mean of noise rates is lower than 1000 Hz/m^2 , and the mean of dark currents is lower than $10 \mu\text{A/m}^2$, which are consistent with the design objects. After that many difficulties such as water drops, high humidity, high voltage sparks, gas leak and data loss, were gotten over during the detector installation and commissioning. After combine and debugging in the detector and aid systems, the detector worked in time and normally.

The bakelite RPC is featured by big noise rates. So the precise calculation of the efficiency and noise rates become the key when in the environment with low event rates. The calibration algorithms were developed in NuWa offline framework. Based on the calibration software, the 3/4 efficiencies from EH1, EH2 and EH3 are $(95.13 \pm 3.2)\%$, $(91.11 \pm 5.5)\%$, $(97.53 \pm 3.1)\%$, respectively. And after long term monitoring, the performance decline of detector was found. By doing all kinds of tests, the spacer ungluing as the main reason is acknowledged. Especially the different layer with different location was loaded by different pressure, which makes different performance decline. In the end, some suggestions about making RPC detector perfect from different view such as bare chamber production, module structure design and installation were given.

Key words:

Daya Bay, low counting rate, RPC, cosmic rays test, commissioning, offline calibration, performance decline

目 录

摘 要.....	I
目 录.....	V
图目录.....	IX
表目录.....	XIII
第一章 引言.....	15
第二章 大亚湾反应堆中微子实验.....	17
2.1 物理目标	17
2.1.1 中微子简介.....	17
2.1.2 实验意义.....	19
2.2 大亚湾实验总体规划	20
2.2.1 实验设计方案.....	20
2.2.2 实验厅布局和基线优化.....	21
2.3 探测器设计	23
2.3.1 反中微子探测器.....	24
2.3.2 反符合探测器.....	25
2.4 实验误差和结果	27
第三章 阻性板室探测器的设计.....	30
3.1 阻性板室的应用和工作原理	30
3.2 阻性板室探测器的设计指标	31
3.3 探测器设计	31
3.3.1 阻性板材料.....	31
3.3.2 读出条设计.....	35
3.3.3 匹配电阻.....	37
3.3.4 工作气体.....	39
3.4 北京谱仪和大亚湾实验的阻性板室探测器比较	44
3.5 本章小结	45
第四章 阻性板室探测器的宇宙线测试.....	47
4.1 测试准备工作	47
4.1.1 裸室高压连接器的制作.....	47
4.1.2 裸室的老练.....	49
4.2 裸室的测试方法	52
4.2.1 裸室测试系统搭建.....	52

4.2.2	裸室合格标准和测试时间.....	55
4.2.3	测试系统设置和测试流程.....	56
4.3	测试结果分析	58
4.3.1	裸室工作高压的选择.....	58
4.3.2	测试结果统计.....	58
4.3.3	常见问题讨论.....	60
4.4	阻性板室模块组装和测试*.....	62
4.4.1	模块组装流程与工艺要求.....	62
4.4.2	模块测试方法.....	65
4.4.3	模块测试结果.....	66
4.4.4	模块振动测试.....	67
4.5	数据库软件简介和安装	68
4.6	数据库设计	68
4.6.1	电木板.....	69
4.6.2	阻性板室.....	69
4.6.3	模块.....	70
4.7	数据库功能	70
4.7.1	查询功能.....	71
4.7.2	统计功能.....	71
4.7.3	显示功能.....	72
4.7.4	数据输入功能.....	72
4.8	本章小结	73
第五章	阻性板室探测器的安装、调试和试运行.....	75
5.1	阻性板室探测器安装	75
5.1.1	模块安装前准备.....	75
5.1.2	模块安装.....	76
5.1.3	模块的摆放和坐标.....	78
5.2	探测器辅助系统	80
5.2.1	高压系统.....	80
5.2.2	气体系统.....	82
5.2.3	电子学和数据获取系统.....	83
5.3	阻性板室探测器试运行	87
5.3.1	触发延迟扫描.....	87
5.3.2	阈值扫描.....	88
5.3.3	高压扫描.....	90

5.4 本章小结	90
第六章 探测器离线刻度的算法和结果.....	91
6.1 NuWa 离线软件.....	91
6.2 电子学信道与读出条的映射	93
6.3 刻度算法	94
6.3.1 刻度常数定义.....	94
6.3.2 效率刻度.....	94
6.4 噪声率刻度	103
6.4.1 层噪声率刻度.....	103
6.4.2 模块噪声率刻度.....	106
6.5 纯度刻度	107
6.6 μ 子通量计算.....	108
6.7 本章小结	108
第七章 探测器性能稳定性研究.....	109
7.1 探测器性能长期性跟踪	109
7.2 效率下降原因分析和相关测试	112
7.2.1 电阻率测试.....	112
7.2.2 裸室的解剖.....	113
7.2.3 高压扫描结果分析.....	114
7.2.4 解决办法.....	117
7.3 改进阻性板室探测器的建议	119
7.4 好的运行文件挑选	120
7.4.1 挑选的目标.....	120
7.4.2 挑选的困难和对应的解决办法.....	120
7.4.3 挑选的结果.....	121
7.5 本章小结	122
第八章 总结与展望.....	123
参考文献.....	125
发表文章.....	129
附录 1	131
致 谢.....	133

图目录

图 2.1 基本粒子分类.....	17
图 2.2 中微子的质量本征态和弱作用本征态.....	18
图 2.3 大亚湾的地理位置图.....	21
图 2.4 反应堆中微子振荡几率与离反应堆距离的关系.....	22
图 2.5 大亚湾实验反应堆和实验厅布局.....	23
图 2.6 大亚湾探测器布局.....	23
图 2.7 实验大厅示意图.....	23
图 2.8 反中微子探测器内部照片.....	24
图 2.9 反中微子探测器结构图.....	24
图 2.10 快慢信号的产生过程.....	25
图 2.11 中子俘获能谱.....	25
图 2.12 反符合探测器安装现场.....	26
图 2.13 水契伦柯夫探测器的结构图和实物图.....	27
图 2.14 远近点能谱比较.....	28
图 2.15 大亚湾实验各个厅测得的中微子振荡几率.....	28
图 2.16 各个中微子实验的 θ_{13} 非零的排除和比较.....	29
图 3.1 阻性板室探测器内部结构示意图.....	31
图 3.2 阻性板室探测器流光模式信号.....	31
图 3.3 北京谱仪和 Babar 的阻性板表面成像.....	32
图 3.4 阻性板体电阻率测试装置图.....	34
图 3.5 标准体电阻率的统计分布.....	34
图 3.6 数字式读出的位置分辨率.....	36
图 3.7 不同宽度的 2m 读出条的信号幅度比较.....	36
图 3.8 不同宽度的 6m 读出条的信号幅度比较.....	36
图 3.9 大亚湾“Z”型读出条设计.....	37
图 3.10 入射信号穿越分界面示意图.....	37
图 3.11 有效介电常数在[1,10]范围内对应的读出条阻抗.....	39
图 3.12 北京谱仪不同气体比分下阻性板室的效率.....	40
图 3.13 异丁烷含量为%4 的工作气体下阻性板室效率和噪声率坪曲线.....	41
图 3.14 北京谱仪超层组件内部结构图.....	41
图 3.15 四层结构的阻性板室模块.....	43

图 3.16 模块内部各层裸室摆放	43
图 3.17 模块内部结构	44
图 4.1 镀金和镀银插针的实物图	47
图 4.2 插针焊接和涂胶	48
图 4.3 裸室老练软件界面	51
图 4.4 裸室老练过程暗电流随时间的变化趋势	52
图 4.5 裸室的宇宙线测试系统示意图	52
图 4.6 测试所用的 MKS 质量流控制器	53
图 4.7 插件 C139、CCU99 和 ISA 总线的实物图	53
图 4.8 裸室测试现场图	54
图 4.9 原始的阻性板室探测器信号	54
图 4.10 阻性板室探测器的测试电子学示意图	55
图 4.11 数据获取软件设置界面	56
图 4.12 裸室的效率、单计数率和暗电流随高压的变化图	58
图 4.13 所有的和后期测试的裸室效率统计	59
图 4.14 所有的和后期测试的裸室单计数率统计	59
图 4.15 所有的和后期测试裸室暗电流统计	60
图 4.16 裸室效率异常示意图	62
图 4.17 模块测试现场	66
图 4.18 某一模块的小块效率	66
图 4.19 模块 2/4 效率统计分布	67
图 4.20 模块 3/4 效率统计分布	67
图 4.21 小方块 2/4 效率统计分布	67
图 4.22 小方块 3/4 效率统计分布	67
图 4.23 程序结构示意图	71
图 4.24 根据测试日期查询 RPC 编号	71
图 4.25 裸室效率、单计数率和暗电流的统计分布	72
图 4.26 基于 AJAX 技术的图形显示	72
图 5.1 阻性板室安装现场	75
图 5.2 暗电流和体电阻率测试结果	76
图 5.3 模块吊装	77
图 5.4 水池的管道	78
图 5.5 干燥气管	78
图 5.6 望远镜模块的高压电缆	78
图 5.7 望远镜模块的地线	78

图 5.8 探测器尾气排放管	78
图 5.9 支撑架停车位置	78
图 5.10 阻性板室模块阵列示意图	79
图 5.11 一号厅的支持架侧面实物图	79
图 5.12 阻性板室探测器的辅助系统	80
图 5.13 蓝色金属头打火后烧焦情形	81
图 5.14 阻性板表面绝缘膜破损	81
图 5.15 覆盖在模块上的阻燃防水布	81
图 5.16 干燥气管插入模块内部	82
图 5.17 干燥气流经的管线和通干燥气前后效果比较	82
图 5.18 气体系统结构图	82
图 5.19 二号厅各个模块的气泡率	83
图 5.20 阻性板室电子学的系统结构	84
图 5.21 电子学板卡的基本结构	85
图 5.22 一号厅的触发延迟扫描结果	88
图 5.23 三个厅的效率和噪声率随阈值变化的结果	89
图 5.24 三个厅的触发率随阈值变化的结果	89
图 5.25 三个厅的基于触发率修正的效率随阈值变化的结果	90
图 5.26 三个厅的高压扫描结果	90
图 6.1 离线分析软件 GAUDI 框架的体系结构	91
图 6.2 阻性板室探测器的数据流	93
图 6.3 电子学数据映射举例	93
图 6.4 读出模块数据格式	93
图 6.5 触发模块数据格式	94
图 6.6 层效率计算时所用的 3 重符合事例	95
图 6.7 使用 R2 cut 的前后效果比较	96
图 6.8 由于 μ 子的入射角度不同造成效率偏差的估算	96
图 6.9 三个厅当 $\epsilon(0) = 95\%$ 时, R2 引入的角偏差造成效率偏差的估算	97
图 6.10 三个厅当 $\epsilon(0) = 80\%$ 时, R2 引入的角偏差造成效率偏差的估算	97
图 6.11 一号厅的层效率的 2 维图	99
图 6.12 二号厅的层效率的 2 维图	99
图 6.13 三号厅的层效率的 2 维图	100
图 6.14 三个厅的层效率分布	100
图 6.15 三个厅的层效率统计	100
图 6.16 一号厅 3/4 效率 2 维图	101

图 6.17 二号厅 3/4 效率 2 维图	101
图 6.18 三号厅 3/4 效率 2 维图	101
图 6.19 三个厅的 3/4 模块效率分布	102
图 6.20 三个厅的 4/4 模块效率分布	102
图 6.21 三个厅的 3/4 模块效率统计	102
图 6.22 三个厅的 4/4 模块效率统计	102
图 6.23 一号厅的层噪声的 2 维图	104
图 6.24 二号厅的层噪声的 2 维图	104
图 6.25 三号厅的层噪声的 2 维图	105
图 6.26 三个厅的层噪声分布	105
图 6.27 三个厅的层噪声统计	105
图 6.28 三个厅的模块噪声分布	106
图 6.29 放大的三个厅的 3/4 模块噪声分布	106
图 6.30 三个厅的 4/4 模块噪声分布	107
图 6.31 三个厅的 3/4 模块噪声统计	107
图 6.32 三个厅的 4/4 模块噪声统计	107
图 7.1 三个厅的触发率随时间变化图	110
图 7.2 三个厅的效率随时间变化图	110
图 7.3 三个厅的噪声率随时间变化图	110
图 7.4 三个厅的纯度随时间变化图	111
图 7.5 一号厅正常模块数随时间变化图	111
图 7.6 二号厅正常模块数随时间变化图	111
图 7.7 三号厅正常模块数随时间变化图	112
图 7.8 面电阻率测试	112
图 7.9 二号厅的阻性板的翘曲外观和内部形貌	113
图 7.10 三个厅的各层效率随高压的扫描结果	114
图 7.11 一号厅历次高压扫描的层效率比较	115
图 7.12 一号厅历次高压扫描的各项性能比较	115
图 7.13 二号厅历次高压扫描的层效率比较	116
图 7.14 二号厅历次高压扫描的各项性能比较	116
图 7.15 三号厅历次高压扫描的层效率比较	117
图 7.16 三号厅历次高压扫描的各项性能比较	117
图 7.17 加压装置 U 型夹实物图	118
图 7.18 铁板加压测试实物图	118

表目录

表 2.1 中微子本征态的形象理解	18
表 3.1 不同触发模式下模块的性能比较	42
表 3.2 北京谱仪和大亚湾实验的阻性板室探测器模块设计指标比较	45
表 4.1 裸室宇宙线测试流程表	57
表 4.2 不同效率下所有的和后期测试的裸室的比例	59
表 4.3 不同单计数率下所有的和后期测试的裸室的比例	59
表 4.4 不同暗电流下所有的和后期测试的裸室的比例	60
表 6.1 层效率分别等于 80%或者 95%时各个厅对应的效率偏差	97
表 6.2 基于两种方法得到的阵列效率	103
表 6.3 三个实验厅的 μ 子通量模拟和实测结果比较	108
表 7.1 电阻率测试结果	113
表 7.2 阻性板室正常文件比例	122

第一章 引言

粒子物理学，亦称之为高能物理，在上世纪取得了突飞猛进的发展。因此对粒子物理研究做出杰出贡献的获奖人数占了 20 世纪诺贝尔物理学奖的三分之一多，这从另一个侧面说明了粒子物理研究的重要性和取得的累累硕果。作为粒子物理的重要组成部分理论物理，因为“天空的两朵乌云”引发物理学深刻的变革而得到突飞猛进的发展。然而实验物理比理论物理慢了半拍，究其原因实验设备和手段的发展滞后。很幸运的是，回旋加速器的发明极大程度地改进了实验手段，使得物理学家拥有了强大的粒子源，而云雾室、气泡室等探测器的相继出现，则推动了探测手段的更新换代。在这种时势造英雄的历史背景下，正电子、 μ 子和核裂变等新型粒子和新的实验现象接二连三被捕捉和探测到。二战后随着电子学技术和计算机突飞猛进，探测器技术更是得到了快速的发展，种类趋于多样化以满足日新月异的实验物理目标需求，因此多丝正比室、漂移室、液体闪烁体探测器和半导体探测器等气体、液体和固体探测器相继被发明。

而粒子源也分化为高能量研究、高亮度研究和非加速器物理这三个实验前沿。高能量前沿的粒子源，欧美在这方面的技术积累深厚，主要以美国费米实验室 Tevatron [1]和欧洲核子中心的大型强子加速器（LHC）[2]为代表。日本人另辟奇径，选择高亮度研究作为实验前沿，其最具代表性当属位于日本筑波的高能物理研究所（KEK）开展的 Belle [3]实验，同时还展开了对以低事例率为特征的物理对象的非加速器物理研究，以超级神冈（Super-Kamiokande）为代表的实验取得了丰硕成果。中国作为后起之輩，要想在粒子物理世界取得一席之地，就必须有自己独特的选择，北京谱仪（BESIII）[4]开展了对具有丰富物理目标的粲能区的精确测量研究。而大亚湾实验（Daya Bay）[5]则瞄准了反应堆中微子的精确测量，这类实验具有低本底和高灵敏度的特点，而中国和世界的其它竞争对手如法国的 Double CHOOZ[6]、韩国的 RENO[7]是站在同一起跑线上。2012 年初大亚湾实验公布了关于 θ_{13} 测量取得的重要成果[8,9]，一时间引起了国内外的巨大反响。这也反衬出我国粒子物理取得了举足轻重的进步，也反映了我国科学家选择实验方案的独到眼光和对科学方案的强大执行力。

本篇论文正是围绕大亚湾实验的阻性板室探测器开展研究的。在大亚湾实验之前，阻性板室探测器已经成功应用于 CMS、ATLAS 和 BaBar 等这种高亮度和高计数率实验，也应用在 Opera 实验这种低计数率环境下。值得一提的是，高能所研发了具有自主知识产权的无油阻性板室探测器，成功应用在高亮度的北京谱仪上。但这种无油阻性板室探测器尚未应用在低计数率环境下。众所周知，这种环境下信噪比低，探测器的性能能否和预研阶段的性能保持一致，是一个值得关注的问题，因此本文围绕了这个新型的工作环境，展开了对探测器性能的各方面研究。

论文分为八章。第一章为引言。第二章概要介绍了中微子物理和实验。第三章讨论了阻性板室探测器的工作原理、性能要求和物理设计。第四章叙述裸室和模块的宇宙线测试，以及质量控制数据库的设计和函数。第五章描述探测器的安装和试运行，并描述了出现的各种问题和相应的解决方案。第六章讨论探测器的离线刻度算法和结果。第七章陈述了探测器性能长期稳定性的研究结果。第八章为全文的总结和展望。

第二章 大亚湾反应堆中微子实验

2.1 物理目标

2.1.1 中微子简介

什么是中微子？如图 2.1 所示[10]，根据粒子物理的标准模型，组成物质的基本粒子分为两大类，即费米子（fermion）（左边三列）和玻色子（boson）（右边红色一列）。费米子遵守费米-狄拉克统计（Fermi-Dirac statistics），并且必须遵守泡利不相容原理（Pauli's exclusion principle）。玻色子遵守玻色-爱因斯坦统计，而且不必遵守泡利不相容原理。费米子包括夸克（quark）（紫色两行）和轻子（lepton）（绿色两行）。其中轻子部分是由 e 、 μ 、 τ 以及 e 中微子， μ 中微子和 τ 中微子，以及它们各自对应的反粒子组成。所有中微子（neutrino）都不带电荷，不参与电磁相互作用和强相互作用，只参与弱相互作用。值得注意的是，如果中微子存在振荡（oscillation）则表明中微子的静止质量非零。

Three Generations of Matter (Fermions)			
	I	II	III
mass	$2.4 \text{ MeV}/c^2$	$1.27 \text{ GeV}/c^2$	$171.2 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name	u up	c charm	t top
			0 0 1 γ photon
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$	$104 \text{ MeV}/c^2$	$4.2 \text{ GeV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom
			0 0 1 g gluon
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
			$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z^0 Z boson
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	e electron	μ muon	τ tau
			$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 $W^\pm$ W boson

图 2.1 基本粒子分类

中微子存在质量本征态和弱作用本征态，对此可以和苹果的特征做一个对比理解，具体如表 2.1 和图 2.2 所示。

表 2.1 中微子本征态的形象理解

苹果的颜色	红	青	黄
苹果的味道	酸	甜	涩
中微子质量本征态	ν_1	ν_2	ν_3
中微子味道本征态	ν_e	ν_μ	ν_τ

理论预言如果中微子有非零质量，并且其质量本征态不等于弱作用本征态，中微子传播过程中会发生振荡，即一种中微子在飞行中变成另一种中微子。值得注意的是，中微子的产生和探测是用中微子的味道本征态描述，其传播则是用中微子的质量本征态描述。如公式(2.1)所示，在弱相互作用下的味道本征态 $|\nu_\alpha\rangle$ 可以表示为质量本征态 $|\nu_i\rangle$ 的线性叠加，二者关系可利用 Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo(MNSP)矩阵描述，具体见公式(2.2)。

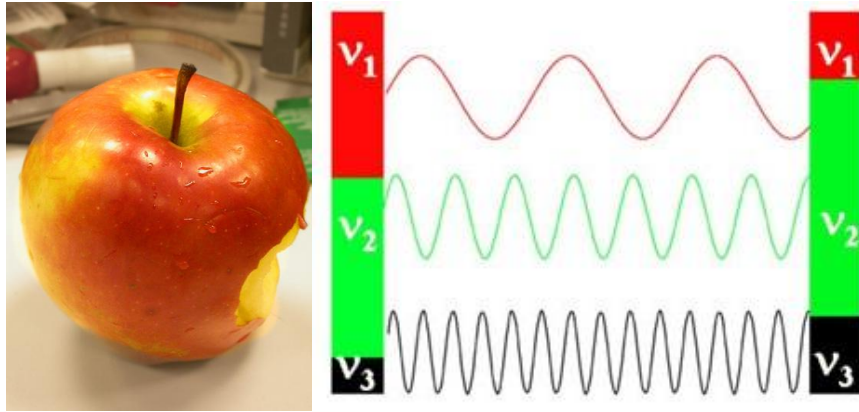


图 2.2 中微子的质量本征态和弱作用本征态

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha,i} |\nu_i\rangle \quad (2.1)$$

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$\times \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} e^{i\phi_1} & & \\ & e^{i\phi_2} & \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

其中 ϕ_1 和 ϕ_2 是 Majorana 相位, 与中微子振荡无关; δ_{CP} 为 CP 相位。参数范围是 $0 \leq \theta_{ij} \leq \pi/2$, $0 \leq \delta_{CP}, \phi_1, \phi_2 \leq 2\pi$ 。

2.1.2 实验意义

通过测量 MNSP 矩阵中 3 个混合角是非零值, 可以证明中微子静止质量不为零。 θ_{12} 描述太阳中微子振荡, 已经由美国的 Homestake [11]、意大利的 GALLEX [12]、苏联的 SAGE [13]、日本的 Kamiokande [14,15] 和加拿大的 SNO [16,17,18,19,20] 等实验最终证明其不为零, 同时也验证了标准太阳模型的可靠性。 θ_{23} 描述大气中微子振荡, 主要由 Kamiokande 和 Super-Kamiokande [21] 实验证明其不为零。

根据中微子振荡理论, 中微子间的振荡规律可由六个参数表示, 即中微子之间的两个质量平方差 Δm_{21}^2 和 Δm_{32}^2 , 三个混合角 θ_{12} 、 θ_{13} 和 θ_{23} , 还有一个 CP 相位角 δ_{CP} 。根据先来自太阳、大气、反应堆和加速器实验结果, 振荡参数中有三个半的确切数值: $\sin^2 2\theta_{12}$, $\sin^2 2\theta_{23}$, Δm_{21}^2 和 $|\Delta m_{32}^2|$; 未知的数值包括 $\sin^2 2\theta_{13}$, δ_{CP} , 和 Δm_{32}^2 的符号。

精确测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 将会对理论和实验产生重要的物理影响。首先, 它作为中微子物理中六个最基本的参数之一, 其数值的大小关系到未来中微子物理的发展方向。在 MNSP 矩阵中 $e^{-i\delta_{cp}}$ 和 $\sin\theta_{13}$ 相乘, 因此 θ_{13} 的大小直接决定了中微子振荡中的 CP 破坏强度。如果 $\sin^2 2\theta_{13} > 0.01$, 则中微子的 CP 相角有望通过下一代长基线中微子实验来测量, 进而有可能揭示宇宙中物质—反物质的不对称原因; 如果 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.01$, 则难以通过下一代长基线中微子实验来测量 CP 相角, 需要采用更复杂的办法, 诸如建立中微子工厂实现测量; 其次, 如果 $\sin^2 2\theta_{13}$ 接近于零也预示着有可能存在未知的新物理或一种新的对称性。因此不论是精确测得 $\sin^2 2\theta_{13}$ 或只给出一个很小的上限值, 均有极为重要的意义和深远的影响; 第三, θ_{13} 作为轻子味混合的六个基本物理参数中的两个未知参数之一, 测量它的大小将有助于了解轻子味混合与夸克味混合之间的关系。第四, 中微子振荡是第一个, 也是目前唯一一个超出粒子物理标准模型的物理现象 (标准模型认为中微子静止质量为 0)。因此精确测定它的数值将有助于寻找与鉴别新物理。

2.2 大亚湾实验总体规划

2.2.1 实验设计方案

大亚湾实验之前的最好实验结果由 CHOOZ 实验给出的： $\sin^2 2\theta_{13}$ 上限为 0.17，对应的实验误差是 3.9% [22]。为了能够达到 0.01 的灵敏度，要求将实验的总误差控制在 1% 之内。因此实验选址和方案设计非常关键。之所以选择大亚湾核电站的反应堆来测量 θ_{13} ，主要有两个有利因素：1) 反应堆总功率大，能够提供强的中微子流，这有利于缩短测量时间，减少实验的统计误差。目前有大亚湾和岭澳两个核电站，共六个反应堆，总功率是 17.4 GW；2) 反应堆附近有较厚的岩石圈覆盖，这有助于有效的屏蔽宇宙线减少实验本底。图 2.3 是大亚湾的地理位置图（大亚湾位于图的右上方位置），大亚湾在深圳市区以东约 50 公里，在香港东北约 55 公里。为了能够实现 0.01 的灵敏度，实验设计上还包括以下优化：

1) 远近探测器的相对测量

CHOOZ 实验只有远点探测器，与反应堆的关联误差达到 2.1%。在远近点放置探测器进行相对测量，通过比较远近探测器观测到的中微子事例数和能谱，可以抵消来自反应堆的关联误差。

2) 多模块全同探测器设计

远点共有四个全同的反中微子探测器模块（antineutrino detector）（每个模块有 20 吨的靶质量），两个近点分别有两个探测器模块。这种设计不仅可以抵消不同实验厅之间探测器的关联误差，并且同一个实验厅的模块之间可以相互验证，降低同一个实验厅内探测器间的非关联误差统计性。根据实验需要还可以调换远点和近点的探测器模块，进一步抵消探测器间的微小差异引起的误差。

3) 反中微子探测器采用三层结构

最里层是使用掺钆液闪作为中微子的靶，中间层是由普通液闪构成的集能层，用于收集伽马光子的能量沉积。最外层是使用白油（矿物油）作为屏蔽层，用来减少材料的天然放射性本底，特别是光电倍增管玻璃的天然放射性本底，降低误触发概率。

4) 宇宙线屏蔽和探测

宇宙线引起的快中子本底和放射性同位素本底严重影响 θ_{13} 的精确测量，因此除了利用厚的岩石圈屏蔽宇宙线外，还设计了由水切伦科夫探测器（water cherenkov detector）和阻性板室探测器（resistive plate chambers detector）组成的宇宙线反符合系统，如此对于 μ

子的探测效率高达 99.5% 以上。由于水切伦科夫探测器以 4π 立体角方式包围反中微子探测器，并且确保任何方向上至少有 2.5 m 厚的纯水屏蔽层来隔绝岩石产生的中子和天然放射性。虽然纯水是无法屏蔽宇宙线带来的快中子本底，但是通过标记 μ 子以及利用 μ 子和快中子本底存在时间关联的办法可以去除由绝大部分宇宙线引起的本底。

1. 反中微子探测器模块的顶部和底部放置反射板

反射板一方面可以提高光电倍增管的光收集效率，另一方面可以降低成本，节省了光电倍增管使用数目。在光电倍增管个数不增加的情况下有效提高能量测量精度，减小能量判选带来的误差[23]。



图 2.3 大亚湾的地理位置图

2.2.2 实验厅布局和基线优化

前面提到大亚湾实验利用远近探测器的相对比较测量 θ_{13} ，这种实验方法的理论依据是基于以下公式：

$$\begin{aligned}
 P(\nu_e \rightarrow \nu_e) &= 1 - P_{13} - P_{12} \\
 &= 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu} \right) \\
 &\quad - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu} \right)
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

图 2.4 反映了反应堆中微子存活几率随基线长度 L 的变化关系，可以知道振荡的极大点有 2 个点。第一个极大点是当 $L \approx 1.8 \text{ km}$ ，此时 P_{13} 起主导作用，即 θ_{13} 振荡极大点，第二个极大点是 $L \approx 60 \text{ km}$ ，此时 P_{12} 起主导作用。从图 2.4 分析可知，远点探测器的理想位置应该处于 θ_{13} 振荡极大点，这时能以最大的程度测量振荡效应。近点探测器的理想位置应该处于 θ_{13} 振荡还没有起来的地方，如 $L < 300 \text{ m}$ ，如此近点探测器能很好的测量出尚未发生振荡的反应堆中微子谱。这只是理论上的最优情况。但大亚湾有 6 个反应堆，3 个实验大厅，因此共有 18 组基线。根据模拟计算，综合考虑了振荡幅度（大亚湾近点的探测器会探测到岭澳反应堆的中微子，使得其测量到存在振荡效应的中微子）、宇宙线本底（由于岩石圈厚度不均匀， $L < 300 \text{ m}$ 内的不同区域 μ 子通量不同）和反应堆误差后，三个实验厅的位置如图 2.5 所示。根据这种方案，有望远近点所有探测器运行三年之后，测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的灵敏度在 90% 置信水平上达到 0.01（这只是当时基于 θ_{13} 较小假设的理论估计，但后来发现 θ_{13} 值较大）。

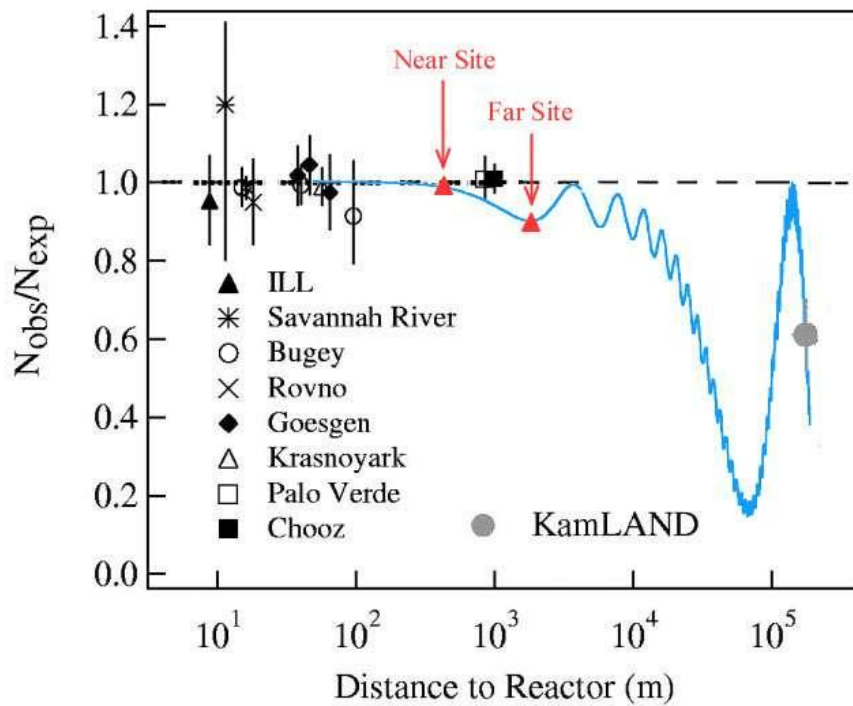


图 2.4 反应堆中微子振荡几率与离反应堆距离的关系

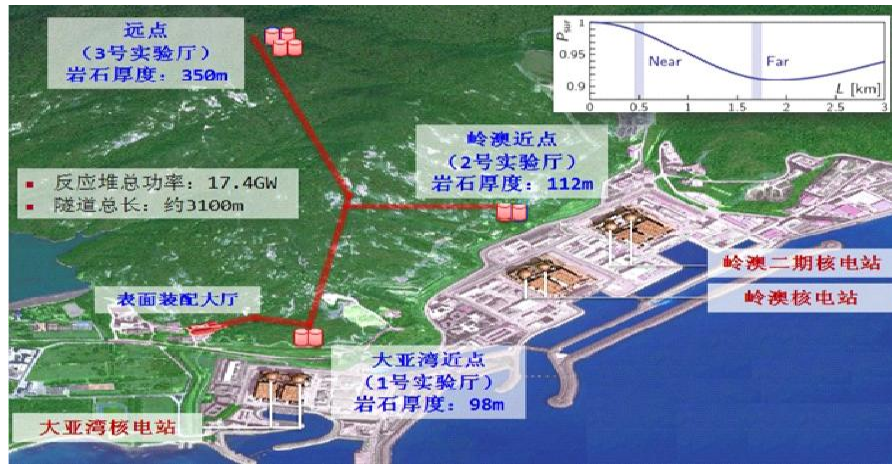


图 2.5 大亚湾实验反应堆和实验厅布局

2.3 探测器设计

如图 2.6 和图 2.7 所示, 大亚湾的探测器主要由两部分构成: 一是专门用来探测反应堆反电子中微子的反中微子探测器[24], 二是用于排除宇宙线本底的 μ 子探测器, 或者称之为反符合探测器。反符合系统是由水切伦科夫探测器[25]和阻性板探测器[26]组成, 两者独立探测 μ 子, 可以相互检验 (cross check), 并给出 μ 子的联合探测效率。水切伦科夫探测器以超纯水作为探测介质, 既可用于探测 μ 子又可以屏蔽周围的放射性本底。反中微子探测器浸没于其中。阻性板室探测器作为顶部探测器, 位于水池的正上方, 主要用于探测来自水池上方的 μ 子 (宇宙线集中分布在与地面垂直的 90 度方向附近)。水池两边的中部, 且距离地面约 3 m 的地方, 放置两个阻性板室模块探测器, 主要用于探测 μ 子的角分布[27]。

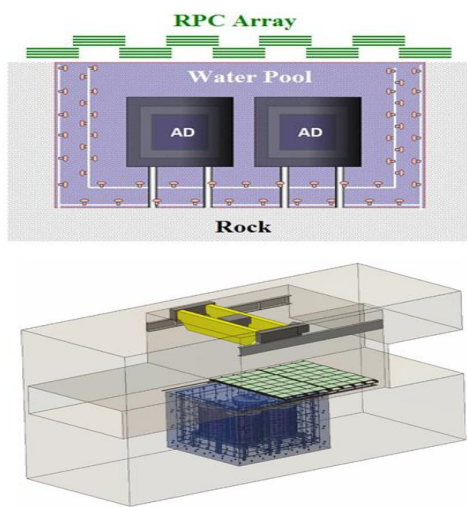


图 2.6 大亚湾探测器布局

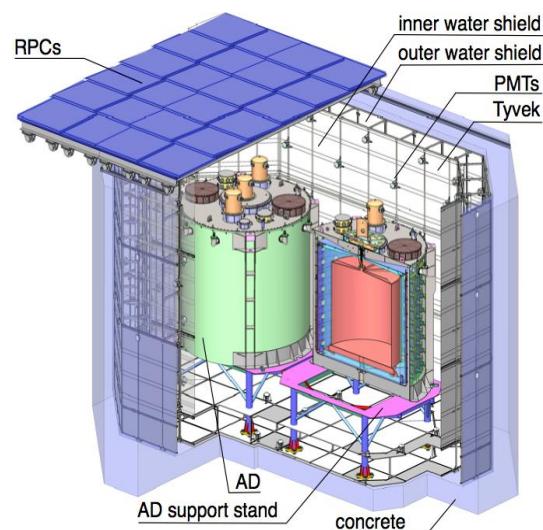


图 2.7 实验大厅示意图

2.3.1 反中微子探测器

图 2.8 和图 2.9 分别是反中微子探测器内部的照片和结构示意图。大亚湾实验一共有八个反中微子探测器，其中大亚湾和岭澳两个近点实验厅分别放置两个，远点实验厅放置四个。反中微子探测器的尺寸是 5 m 的直径和 5 m 的高度，采用三层同心圆柱结构，由里到外分别为掺钆（Gd）液闪层，普通液闪层和矿物油层。其中最里层和中间层的液体分别用直径 3 m 和 4 m 高透光度的有机玻璃罐容器进行承载，最外层的矿物油是基于不锈钢制作的钢罐承载。在矿物油层中反射板紧贴着 4 m 的有机玻璃罐的顶部和底部，光电倍增管安装在支撑结构上。最内层是 20 吨钆含量为 0.1% 的掺钆液体闪烁体，作为探测中微子的靶物质；中间层是 20 吨普通的液体闪烁体，其作用是辅助收集掺钆液闪层中的中子俘获发出的 γ 光子的能量沉积，提高中微子的探测效率，并保证三米有机玻璃罐定义的掺钆液闪是反电子中微子探测的靶，这使得不需要通过位置重建来确定中微子靶的有效体积，中微子靶质量造成的系统误差来源于质量测量的精度；最外层是 40 吨的高透明度矿物油，主要是屏蔽由于光电倍增管玻璃以及不锈钢外罐引起的天然放射性本底。

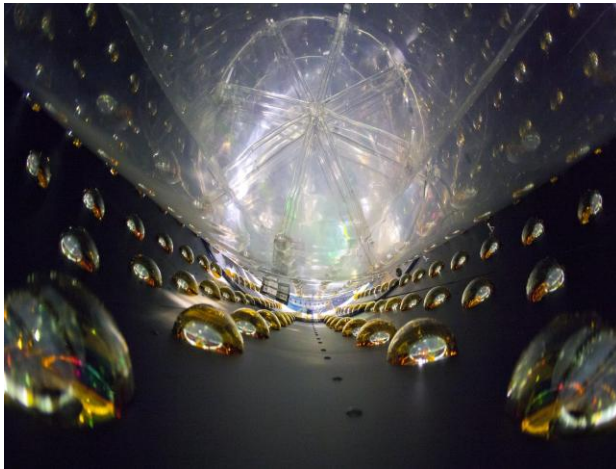


图 2.8 反中微子探测器内部照片

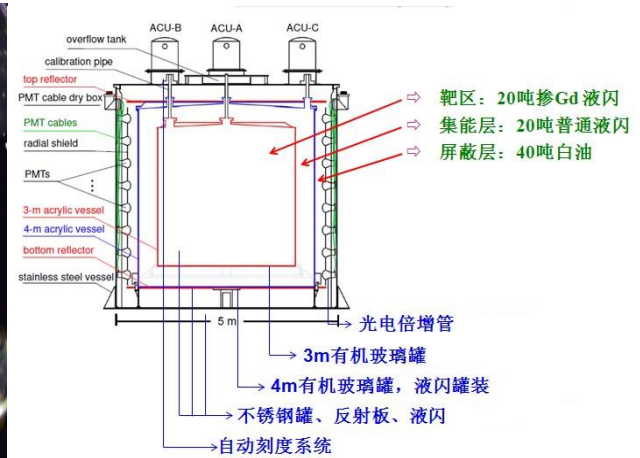


图 2.9 反中微子探测器结构图

如公式(2.4)所示，大亚湾实验是利用反 β 衰变反应（Inversed Beta Decay, IBD）探测反应堆的反电子中微子。



如图 2.10 所示，反应的末态产物中， e^+ 带走大部分的动能并最终发生正电子湮灭，总的能量沉积范围是 1.8 MeV 到 8 MeV。由于该过程在反 β 衰变反应完成后的几纳秒内完成，因此被认为是快信号。中子经过 28 μ s 的平均时间后会被俘获放出总能量为 8 MeV 的 γ 光

子，因此被认为是慢信号。因此中微子信号特征是存在快慢信号。通过快慢信号符合，可以有效地排除本底，具体方式如下：1) 快慢信号符合时间窗是 1 - 200 μs ；2) 快信号能量范围是 0.7 - 12 MeV，慢信号能量范围 6 - 12 MeV。此外，需要理解有两个问题：

1) 采用掺钆液闪的原因

如图 2.1 所示，如果仅采用普通液闪，中子经过 $\sim 200 \mu\text{s}$ 后被氢核俘获后放出的 2.2 MeV 的 γ 光子，与天然放射性能区重合，这就容易引入了天然放射性本底 ($< 3 \text{ MeV}$) 与快信号的偶然符合。利用掺钆液闪，中子经过约 28 μs (不同的钆浓度会得到不同的中子捕获时间，只有钆浓度是 0.1% 的液闪对中子的捕获时间才约是 28 μs) 后被钆俘获后可以得到慢信号的能量在 8 MeV，远离天然放射性能区，并且事例挑选窗口大为缩小，这就可以大大的压低天然放射性本底偶然符合。

2) 液闪的氢核副作用

不可否认掺钆液闪的氢核也有可能俘获中子，但是根据理论数据表明，钆的中子俘获截面约是 49000 b，氢的中子俘获截面约是 0.3 b，这就使得氢核俘获中子的比率可以忽略不计 (事实上大亚湾做过专门挑选中子被氢核俘获的中微子事例，并得到 θ_{13} 非零的可能性在 3σ 左右[28]，并且较小的钆含量就能获得较高的钆俘获比例。

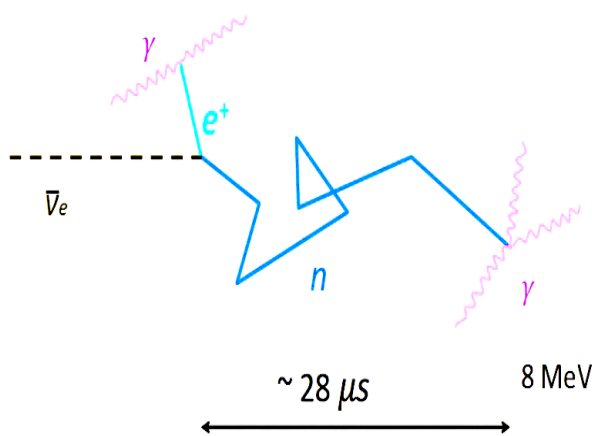


图 2.10 快慢信号的产生过程

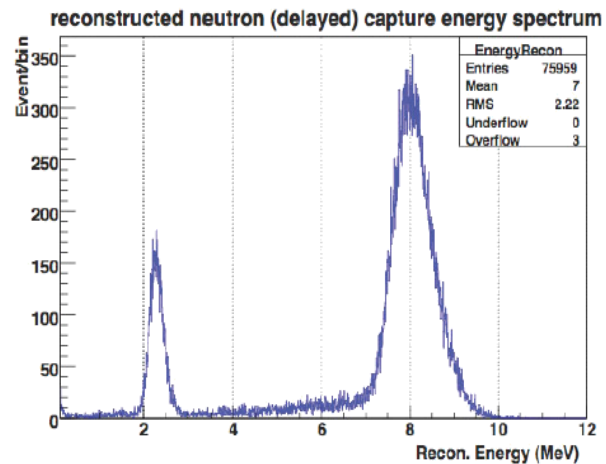


图 2.11 中子俘获能谱

2.3.2 反符合探测器

大亚湾中微子实验的本底主要来源于宇宙线中的 μ 子及其产生的次级粒子和实验厅周围的岩石释放出大量的 γ 光子本底。减小本底的主要方法是选择较厚的岩石覆盖区域放置

探测器，并将探测器放置在屏蔽层内。为此将反中微子探测器放在各个方向上水屏蔽层至少 2.5 m 厚的超纯水中，从而使能量在 1 - 2 MeV 的 γ 光子在穿过 2.5 m 的水屏蔽层后，其数量将被压低 6 个数量级。 μ 子穿过实验厅周围的岩石时会发生核散裂产生快中子在穿过此水屏蔽层后，也将被压低几倍。值得注意的是，这类 μ 子不一定经过反符合探测器，因此无法通过标记 μ 子利用时间关联的方式压低其产生的快中子。此外，水屏蔽层还将反中微子探测器与空气隔绝开来，可以降低空气中的氦气带来的本底。 μ 子在水层和反中微子探测器中产生的快中子关联事例会形成中微子伪事例，是主要的潜在本底。为了能够压低这类快中子本底，因此实验采用水契伦柯夫探测器、顶部阻性板室探测器的反符合探测器来标记穿过水屏蔽层的 μ 子事例，从而利用时间关联的方式有效压低其产生的快中子本底。图 2.12 为反符合探测器安装的现场图。

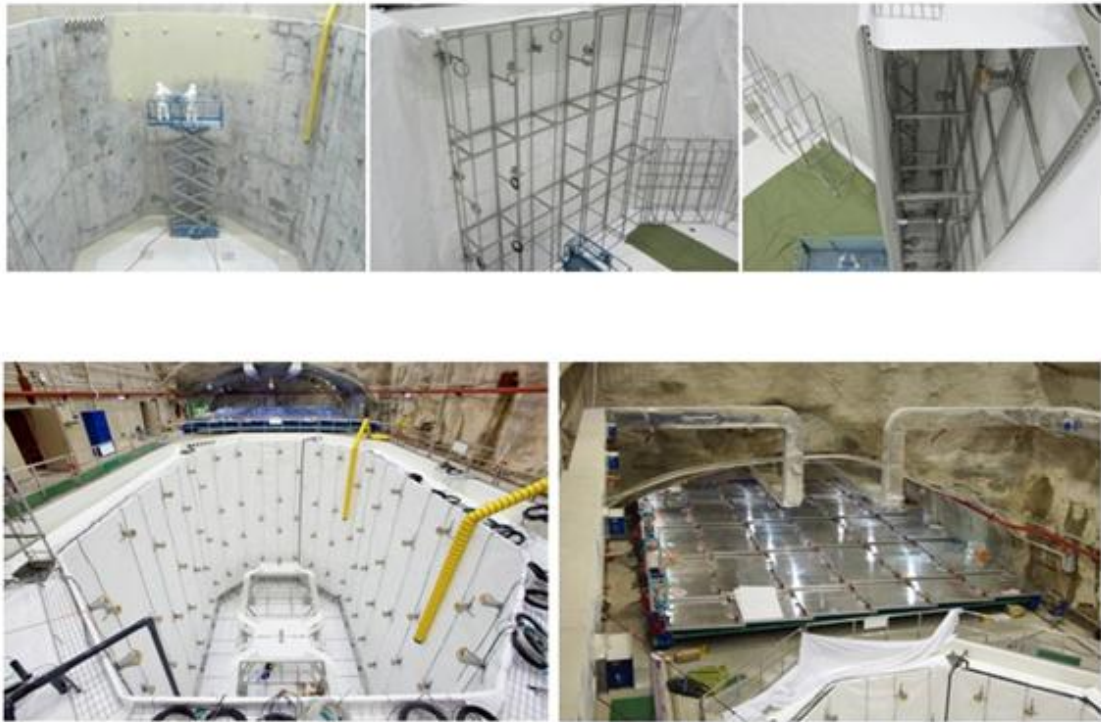


图 2.12 反符合探测器安装现场

如图 2.13 左图所示，远点水池为八角形，尺寸为 16 m $\times$ 16 m $\times$ 10 m，去掉的四个角边长是 2.93 m。近点水池也为八角形，尺寸为 16 m $\times$ 10 m $\times$ 10 m，去掉的四个角边长亦是 2.93 m。水池八边形的结构有利于水池内纯净水的循环。同时为水池配套了净化和循环系统，这样可使水池的水保持高的透明度，从而确保对 μ 子具有长期的高效探测效率。水屏蔽层被安装在不锈钢钢架上的 Tyvek 反射膜分隔成两个独立的光学部分，并且钢架上安装

了空间位置均匀分布的一定数量的光电倍增管（近点 288 个 8" 光电倍增管，远点 384 个 8" 光电倍增管），构成内外两层水契伦柯夫探测器。水池的外层和底部的水厚度为 1 m。

在水池顶部的是阻性板室探测器。阻性板室探测器是由尺寸为 $2.2\text{ m} \times 2.17\text{ m}$ 的阻性板室模块组成的阵列。远厅共有 9×9 个阻性板室模块，两个近厅有 6×9 个阻性板室模块。阻性板室阵列的覆盖范围在长宽方向都比水池多出 1 m 左右，以减少水池边缘的侧向覆盖空隙。每一个阻性板室模块由 4 层裸室组成，假设单层阻性板室的探测效率为 95%，那么阻性板室模块在 4 选 3 的触发模式下效率将达到 98.6%。阻性板室信号的读出采用一维条读出方式，相邻两层形成二维定位，对 μ 子径迹的重建精度可以达到 10 cm 左右。

两层水契伦柯夫探测器与阻性板室探测器的组合，对 μ 子产生中子的有效排除效率可以达到 99.5% 以上，误差小于 0.25%。这样设计的突出优势在于，在反中微子探测器周围的任何一处，都有两个独立的反符合探测器系统，可分别对 μ 子进行独立探测，互相检验，确定各自的探测效率。

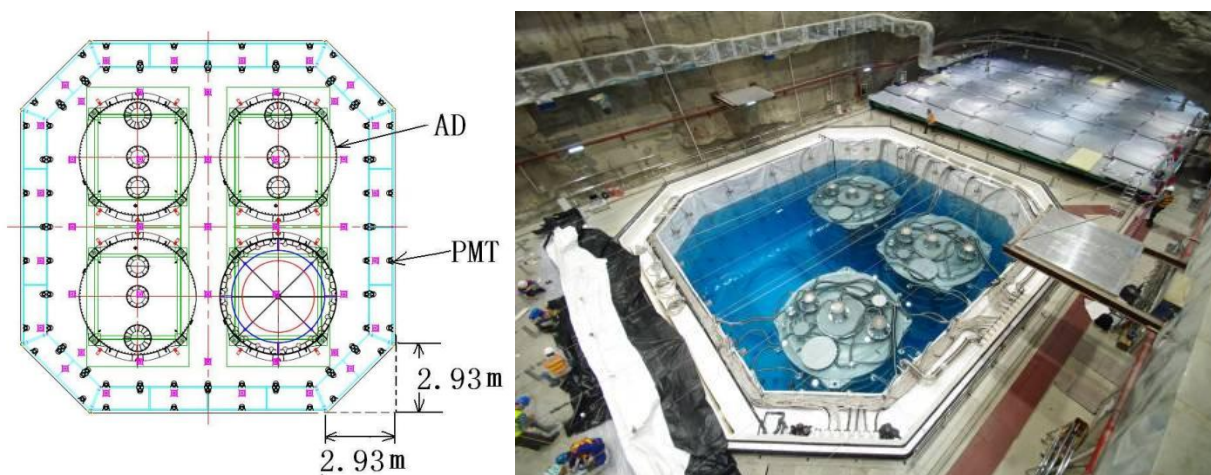


图 2.13 水契伦柯夫探测器的结构图和实物图

2.4 实验误差和结果

为了在 90% 以上的置信水平下确认振荡的存在（即 $\sin^2 2\theta_{13} > 0$ ），这要求实验的总的误差小于 0.6%。实验误差包括统计误差和系统误差，前者可以通过中微子统计量的提高而逐渐降低，具体方式包括延长探测器的取数时间和使用较大的靶质量。模拟结果表明，远点 80 吨的靶质量和三年的取数时间可以使得统计误差小于 0.2%。系统误差不会随着中微子统计量的提高而降低，因此大亚湾实验的难点在于系统误差的控制。反应堆中微子实验的系统误差是由反应堆、探测器和本底的误差贡献的，其中前两者又可以细分为关联误差和非

关联误差。采用远近点相对测量可以抵消反应堆的关联误差，采用全同反中微子探测器可以抵消探测器的关联误差，足够的屏蔽层和性能良好的反符合探测器可以有效的排除本底，使得噪声信号比小于0.3%。

正式取了55天的数，远点3个AD加起来差不多10000个中微子事例（对此可以做粗略估算：如果需要达到0.2%的统计误差，则根据统计误差等于统计量开根号的倒数关系，需要的统计量是55天统计量的25倍，考虑到新增加了一个反中微子探测器， $55 \times 25 \times 3/4 = 1032$ 天，约等于3年）。为了能够赶超国外同行，在2012年3月8日，大亚湾率先公布了采用6个反中微子探测器测得的结果[8]：

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016(stat.) \pm 0.005(syst.)$$

目前大亚湾公布的最新结果[9]是：

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.010(stat.) \pm 0.005(syst.)$$

如图 2.14 和图 2.15 可以看到由于反应堆中微子在飞行过程中发生振荡，导致测得的反电子中微子数目变少和能谱发生畸变，通过比较中微子变少的比例和能谱畸变的程度，可以计算在 $\sin^2 2\theta_{13}$ （目前 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的精确测量是利用第一种办法，而下一步将会发表利用能谱分析的结果）[29]。图 2.16 左图显示了各个实验测量 θ_{13} 非零值的精度，可以看到大亚湾实验的结果远远好于其他实验，右图各个实验表征 θ_{13} 的所在位置，以及实验的误差棒，可以看到大亚湾最新的结果远远高于同类实验。

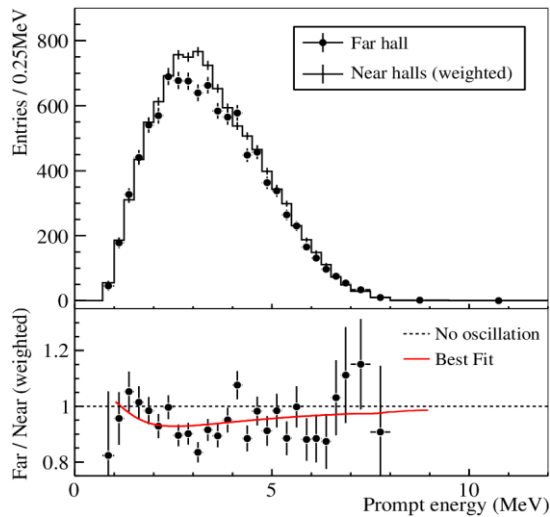


图 2.14 远近点能谱比较

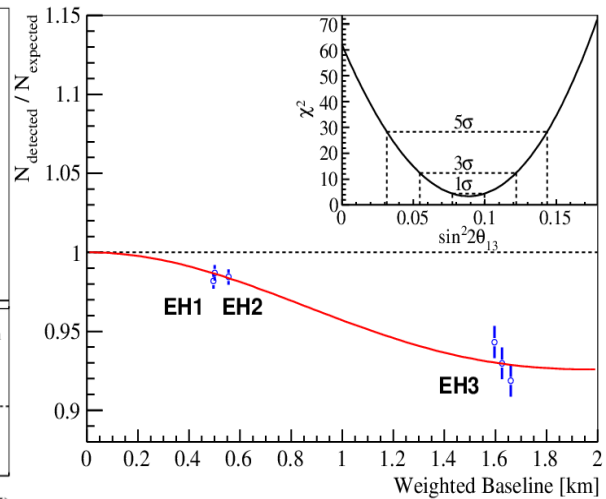
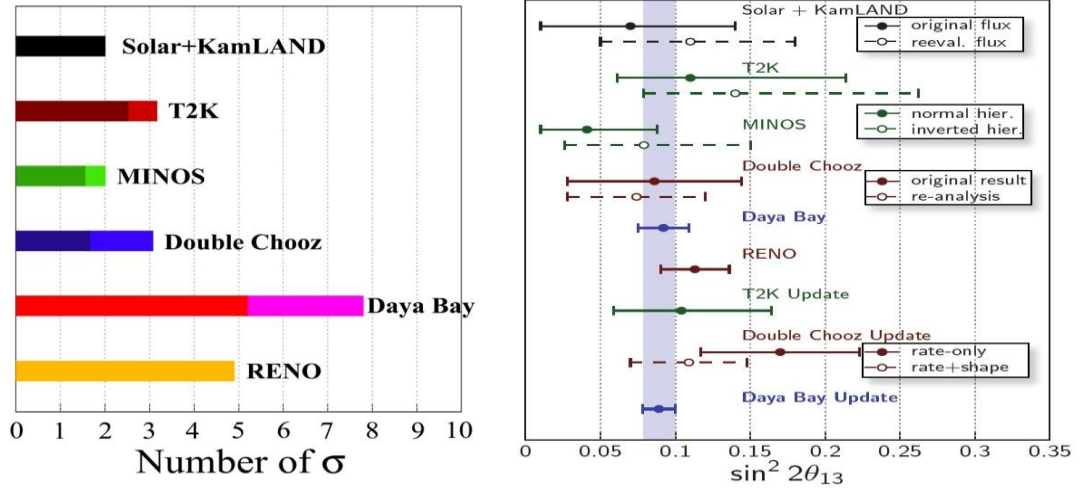


图 2.15 大亚湾实验各个厅测得的中微子振荡几率

图 2.16 各个中微子实验的 θ_{13} 非零的排除和比较

第三章 阻性板室探测器的设计

3.1 阻性板室的应用和工作原理

阻性板室探测器是上世纪80年代由R.Santonico等人在丝室基础上开发出来的一种新型气体探测器[30]。阻性板室探测器采用高体电阻率的绝缘材料平行板作为正负极，形成工作电场，当带电粒子穿过气隙与气体分子碰撞会产生离子电子对，电子在电场作用下向正极漂移发生雪崩放大，最终使阻性板室内部产生雪崩或流光信号，并使用感应读出条拾取信号。这种设计大大地降低了结构的复杂度、工艺技术的要求和电子学信道的数量，从而大大降低了制造成本，并获得一定的空间分辨和高的探测效率。这也是阻性板室探测器在大面积探测器中在高计数率的对撞机实验得到广泛应用的原因，例如在BaBar [31]，BELLE [32]，ALICE [33]，ATLAS [34]，CMS [35]和北京谱仪[36, 37, 38, 39, 40, 41]等实验上都存在广泛应用。特别是高能所成功开发用于北京谱仪新型无油电木板阻性板室探测器，经过宇宙线和束流的考验，其性能的可靠性和稳定性得到了验证，并进一步应用中子探测[42]和数字强子量能器[43]上面。基于在北京谱仪上丰富的经验积累，根据大亚湾实验需求做了有关预研，并在原有技术基础上大亚湾的阻性板室探测器性能得到进一步优化[44,45,46,47,48]。这也是无油阻性板室探测器首次在低计数率实验的应用。

如图 3.1所示， μ 子穿过阻性板室探测器时会与两块阻性板之间的气隙层的气体分子发生碰撞，使其激发或电离，产生初级带电粒子。这些粒子在高压电场下漂移，不断使得气体电离出新的带电粒子，最后形成雪崩信号，如果满足某些条件，还会进一步形成流光信号。当阻性板室内部某一个点发生雪崩或者流光时，在阻性板正负电极的相应位置将会产生电场的变化，从而感生出等量的负、正电荷。阻性板会吸收部分的感应电荷，通过阻性板室外侧的感应读出条拾取信号。图 3.2显示了流光模式下利用示波器测量的阻性板室信号。北京谱仪阻性板室探测器工作在流光模式，输出信号不需要添加前置放大器在100 Ω 匹配下就可以达到200~400 mV的幅度，信号上升时间约为20 ns，下降时间约为100 ns [49]。

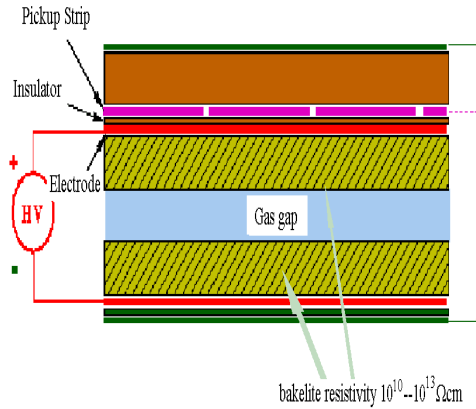


图 3.1 阻性板室探测器内部结构示意图

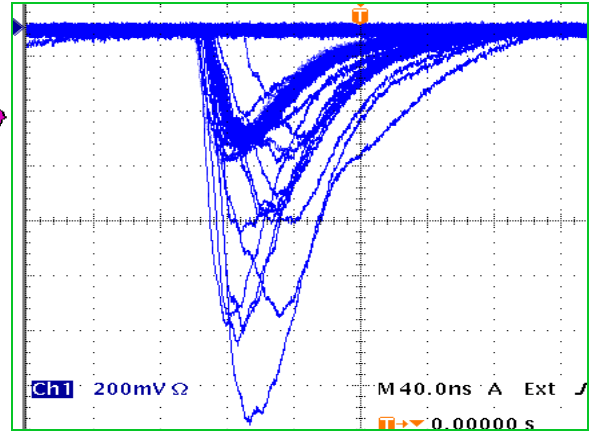


图 3.2 阻性板室探测器流光模式信号

3.2 阻性板室探测器的设计指标

北京谱仪 μ 鉴别器位于北京谱仪的最外层，其中位于桶部区域共有 9 层阻性板室探测器，端盖共有 8 层阻性板室探测器，因此不仅可以测量 e^+e^- 对撞末态得到的 μ 子，还可以利用探测器自身的数据重建出 μ 子的飞行轨迹，并且能确保与主漂移室得到的粒子径迹外推结果一致，从而可以测量 μ 子的动量并有效实现 μ 和 π 鉴别。因此需要关注的指标包括探测效率、 μ/π 分辨、空间分辨和使用寿命（老化）。因此北京谱仪 μ 鉴别器的性能指标是 [50]：单层的探测效率 $\geq 95\%$ ，空间分辨 $\sigma_z < 30 \text{ mm}$ ， $\sigma_{r\phi} < 30 \text{ mm}$ ，时间分辨不高于 50 ns， μ/π 分辨效率 $P(\mu/\pi) < 5\% @ 1.0 \text{ GeV}$ ，使用寿命 > 5 年。

大亚湾的阻性板室探测器用于宇宙线反符合探测，主要目的是通过标记 μ 子来排除 μ 子引入的本底。这就要求对 μ 子有较高的探测效率，偶然符合形成的噪声率较低，较长的使用寿命，同时能按照一定精度给出 μ 子的径迹。因此大亚湾阻性板室探测器的性能指标是：单层的探测效率 $\geq 95\%$ ，噪声率 $\leq 1000 \text{ Hz/m}^2$ ，使用寿命 ≥ 3 年。

3.3 探测器设计

3.3.1 阻性板材料

阻性板作为阻性板室探测器的电极，其材料成份可分为酚醛树脂（bakelite）和玻璃（glass）两种，其中 BaBar、ATLAS 和 CMS 采用前者，Belle 和 STAR 则采用后者。玻璃材料的优点是硬度高，表面光滑，体电阻率分布均匀，不易受到环境温湿度变化的影响，

但是很容易被放电过程中产生的氢氟酸（HF）腐蚀[51]，最主要的缺点就是易碎，这就不利于其用于大面积阻性板室探测器的制作。酚醛树脂也称为电木，主要由苯酚、甲醛和纸基构成，并添加适量的调和剂和固溶剂，通过共缩聚化合反应得到酚醛树脂分子链状结构。这种阻性板体电阻率的选择可以通过在生产过程中对原料的配比来实现的。由于不同的温度和制板压力，也会影响阻性板的体电阻率和机械性能，因此压制过程中需要严格控制环境温度和制板压力，并保证在无尘的工作环境下完成。经过反复测试，最终选择北京谱仪阻性板的体电阻率在 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 时范围是 $0.2 \times 10^{12} \Omega\cdot\text{cm} - 2.0 \times 10^{12} \Omega\cdot\text{cm}$ [36,37]。酚醛树脂的性能有些类似纸张，因此避免了玻璃易碎的缺点。但是其容易受到环境温湿度和气压变化的影响[52]，并且其表面光洁度次于玻璃，因此还需要做表面处理进一步改善光洁度。国外常用的办法是采用在表面涂亚麻油（linseed oil）的工艺（亚麻油的优点是可以自然风干，具有类似特点的还有桐油，但常用的一般是熟桐油），但是涂油的工艺复杂且涂油的阻性板室在较高的温度下性能急剧下降[53]。为此北京谱仪阻性板的内表面压制了一层称之为三聚氰胺的有机固体薄膜，从而使内表面的光洁度达到很高的水平。图 3.3 分别罗列了北京谱仪阻性板表面和 BaBar 阻性板表面在三维电子隧道显微镜下的成像[50]。可以看到北京谱仪阻性板的表面光洁度要比 BaBar 的好很多，且采用了无油工艺，因此不像 BaBar 的淋油阻性板室那样容易受温度影响，也不如 Belle 的玻璃阻性板容易受到氢氟酸的腐蚀，从而提高了探测器的寿命和运行的稳定性。

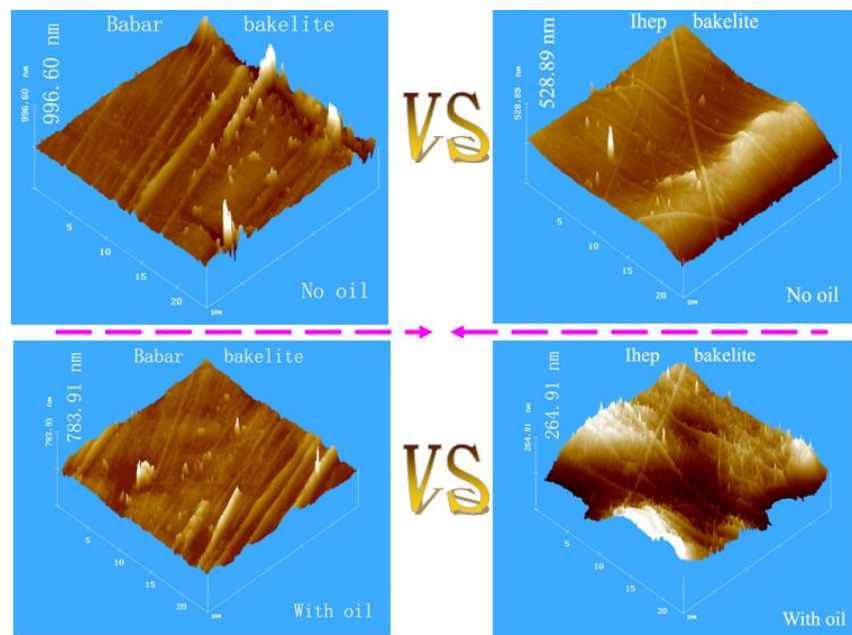


图 3.3 北京谱仪和 Babar 的阻性板表面成像

在北京谱仪阻性板室探测器经过宇宙线测试，试运行和长期运行的考验后，性能的可靠性和长期运行的稳定性得到了确认，基于这个良好的技术基础上，进一步优化了阻性板的体电阻率，在 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 时将其控制在 $0.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm} - 2.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 的范围内，因此提高了阻性板室体电阻率的均匀性，从而使性能趋于一致。

在此对体电阻率的取值范围做一些简要的说明。如果体电阻率过高，使得内部的气隙工作场强较低，以致效率下降。假设探测器上下两层 $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的 2 mm 厚阻性板的体电阻率均为 $2.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 和暗电流是 $100 \mu\text{A}$ ，并且气隙内部处于击穿导通状态，压降 $\Delta V = \text{两块阻性板电阻} \times \text{暗电流} = 2.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm} \times 4 \text{ mm} \times 100 \mu\text{A} / (1 \text{ m} \times 2 \text{ m}) = 5000 \text{ V}$ ，如果工作高压是 7600 V ，则气体内部的场强 $E = U/d = (7600 \text{ V} - 5000 \text{ V}) / 2 \text{ mm} = 1.3 \times 10^6 \text{ V/m}$ 。这是当前探测器正常工作时的内部场强。因此高的体电阻率（例如比当前值高一个数量级）会使得气体内部的场强过低，这样电子漂移的距离需要加长，如此则会进一步缩小原初电离的区域，同时也会增加探测的死时间。因此高的体电阻率能够得到较低的单计数率和暗电流，但也使得坪区效率降低（坪区效率随着体电阻率对数的增大而线性减少）。反之低的体电阻率会使得探测器的单计数率和暗电流较大，但能够得到较高的坪区效率[50]。

由于北京谱仪工作环境呈现高计数率的特点，优先要求阻性板室探测器能够承受高计数率，为此需要牺牲一点探测效率，因此北京谱仪的阻性板体电阻率总体偏小。大亚湾实验具有低计数率的特点，优先要求探测器对 μ 子具有较高的探测效率，因此大亚湾实验的阻性板体电阻率总体偏大。

图 3.4 为阻性板体电阻率测试装置图。根据欧姆定律，体电阻率的测试可以采用以下公式计算：

$$\rho = R \times \frac{S}{d} = \frac{U}{I} \times \frac{S}{d} \quad (3.1)$$

其中 S 是电极的有效接触面积， d 是阻性板的厚度。由于阻性板的体电阻率和温度存在依赖关系，所以每次测试前需要将阻性板在测试环境放置 24 小时。利用以下公式，可将某一温度下的体电阻率换算为 20°C 的标准体电阻率，以便和其他温度下得到的体电阻率进行统一的比较。

$$\rho_{20} = \rho_t 10^{0.06(t-20)} \quad (3.2)$$

其中 t 是测试时的环境温度，单位是 $^\circ\text{C}$ ， ρ_t 是温度为 t 时的阻性板的体电阻率。0.06 是

基于实验结果拟合后的近似参数。图 3.5 显示了亚湾实验用的阻性板 20℃ 平均体电阻率的统计分布¹，可以得到体电阻率的平均值为 $1.298 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

以上的对体电阻率的测试方法对一个完整的阻性板室探测器来说，存在破坏性。因此为了不破坏裸室，又需要了解当前体电阻率的近似值的情形下，往往采用另一种方法。对公式(3.1)做一下变形，就可以得到在往探测器内部通纯氩的情况下，估算阻性板体电阻率的公式：

$$\rho = \frac{U \times S}{2 \times I \times d} \quad (3.3)$$

$2 \times d$ 是两块阻性板的厚度（约为 4mm）。这个估算公式成立的是基于裸室上下两块阻性板的体电阻率近似相等的假设，气隙的电压降可近似看做为 0（高压较高时，气隙压降近似为 0）。因此计算得到的体电阻率是二者的均值。

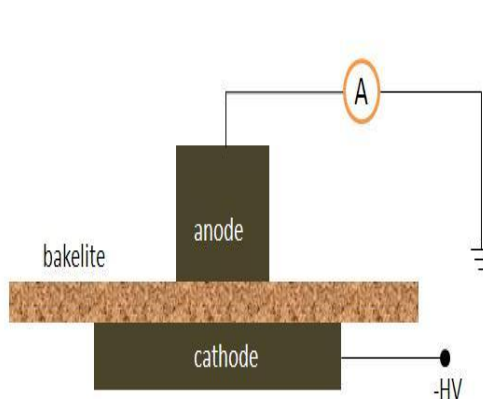


图 3.4 阻性板体电阻率测试装置图

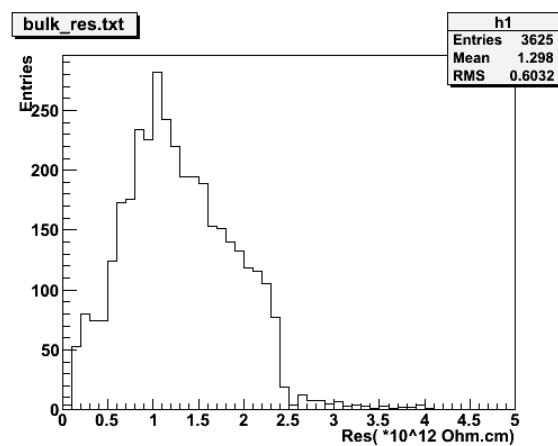


图 3.5 标准体电阻率的统计分布

要求 20℃ 时阻性板表面石墨的面电阻率的范围是 0.4 - 1 MΩ/□，面电阻率低于或者高于这个范围都不好。这是由于涂覆石墨层的阻性板那一面仅一端有高压插针，如果面电阻率过高的，使得远端因高压压降过大，使得加载在上面的高压过低。举个例子，假设面电阻率为 1 MΩ/□ 和暗电流是 100 μA，对于一块 1 m × 2 m 的阻性板而言，根据欧姆定律得到压降 $\Delta V = \text{面电阻方块数} \times \text{面电阻率} \times \text{暗电流} = (1 \text{ m} \times 2 \text{ m}) / (1 \text{ m} \times 1 \text{ m}) \times 1 \text{ M}\Omega / \square \times 100 \mu\text{A} = 200 \text{ V}$ ，如果在阻性板加了 3800 V 高压，最远端实际上只加载了 3600 V 的高压，因此面电阻率不易过高。但是作为夹在阻性板和读出条的石墨层的面电阻率过低，会出现

¹ 体电阻率和面电阻率的测试工作由马烈华博士完成

一定的屏蔽效果，影响到读出条拾取感应信号。

3.3.2 读出条设计

读出条是由厚 0.035 mm 铜箔与环氧玻璃纤维基板层 (FR4) 压成型的覆铜板，成型厚度为 0.25 - 0.3 mm。阻性板室探测器的信号可以利用紧贴阻性板的外表面的读出条进行感应读出。阻性板室产生流光或者雪崩信号使得阻性板上某个位置的电荷密度变大，从而使得读出条对应位置能感应出电流，该电流分别沿着读出条向两端读出。读出条信号通常采用单端读出，即一端连接信号线（同轴电缆或者排线），另一端则会连接一个阻值尽可能等于读出条特性阻抗的匹配电阻来吸收信号，减少反射信号的产生。由于读出条的宽度和厚度远小于长度，因此可以使用传输线理论模拟信号在读出条传播的行为特征 [54][55][56]。通过信号线连接到前端电子学的甄别器，如果信号幅度大于预设的阈值，则给出一个对应读出条的击中信息。利用同一个物理事例下多根读出条着火的位置信息，可以重建 μ 子径迹 (track)。径迹的精度和读出条的宽度密切相关。

在阻性板室流光模式下，由于读出信号幅度足够大，不需要前置放大器，幅度的大小和粒子沉积的能量不存在正比关系，因此在此情况下采用数字式读出是最简便、最经济的方法。一般认为倍增后的电子团在空间上服从高斯分布 [57]，如图 3.4，在一定的阈值处，数字读出方式的结果相当于在尺寸为 w （即读出条的宽度）的范围内的均匀分布，则其对应的归一化概率密度函数如下式所示：

$$f(x) = \begin{cases} 1/w, & -w/2 < x < w/2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3.4)$$

那么其本征空间分辨率（分布的均方根偏差）为：

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_w^2} = \sqrt{\int_{-w/2}^{w/2} f(x) \times (x - \bar{x})^2 dx} = \frac{w}{\sqrt{12}} \quad (3.5)$$

可以看到在数字读出方式下读出条的宽度越小，空间分辨率就越高。但是考虑到倍增的电子团存在一定的尺寸，因此当读出条的宽度小到一定程度时，会出现多根条同时存在感应信号，空间分辨难以进一步提高。

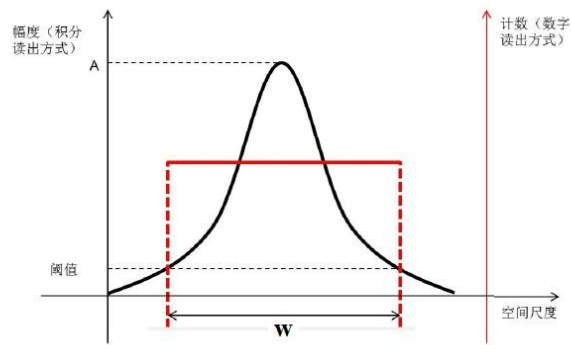


图 3.6 数字式读出的位置分辨率

由于北京谱仪 μ 鉴别器不同部位的读出条的长短不一，因此这里不再深入提及。大亚湾实验最初考虑采用直线读出条，感应信号在这种读出条上沿着直线传送到信号读出端。基于直线读出条主要有两种方案。一是使用用 2 m 长的读出条（与裸室长度相同），这样读出条和阻性板室可以同时封装在一个独立的模块里面。另一方案是参考 OPERA 实验 [58]，使用长读出条，贯穿整个阻性板室阵列（OPERA 用的是 8 m 长读出条），其好处是可以降低电子学读出通道数，从而降低大量的成本。通过研究不同宽度和长度的读出条信号（第一种方案测试不同宽度的 2 m 长读出条，第二种方案测试不同宽度的 6 m 长读出条），证明这两种直线型读出条都可以满足实验需求。2 m 读出条由于传播距离短导致信号衰减少，读出的信号比 6m 读出条更加干净。如图 3.7 和图 3.8 所示，随着读出条的宽度变大，信号的幅度逐渐下降，导致难以区分真实信号和噪声，信噪比变差。但是条宽过小使得电子学读出通道大量增加，导致造价急剧上升。为此需要在这两者之间寻找一个平衡点，在满足实验需求下，尽可能降低成本。

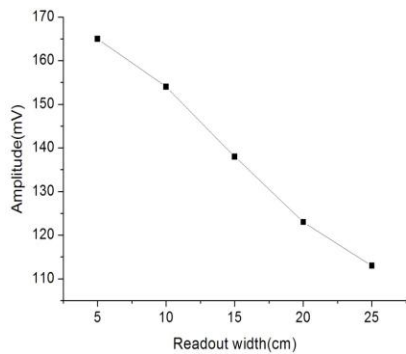


图 3.7 不同宽度的 2m 读出条的信号幅度比较

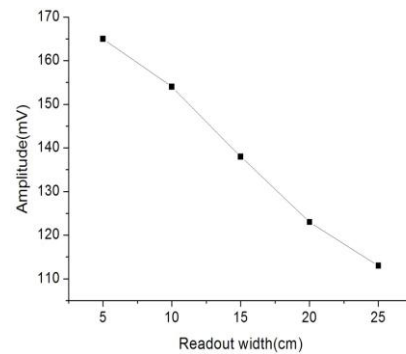


图 3.8 不同宽度的 6m 读出条的信号幅度比较

因此一种较好的解决方案是采用“Z”型读出条，这样可以既节省电子学，又获得较高信号的幅度[59][60]。其结构如图 3.9 所示。“Z”型读出条尺寸为 $2.1\text{ m} \times 0.26\text{ m}$ ，其特点是中间均匀分隔成宽度相等的细条并在端部连接。如果不考虑信号在转弯时候的反射，信号在此“Z”型读出条上传播等效于在 $8.4\text{ m} \times 6.5\text{ cm}$ 的长读出条上传播，获得较好的阻性板室信号。此时由公式(3.5)可得到该读出条对应的空间分辨率是 $26/\sqrt{12} = 7.5\text{ cm}$ 。

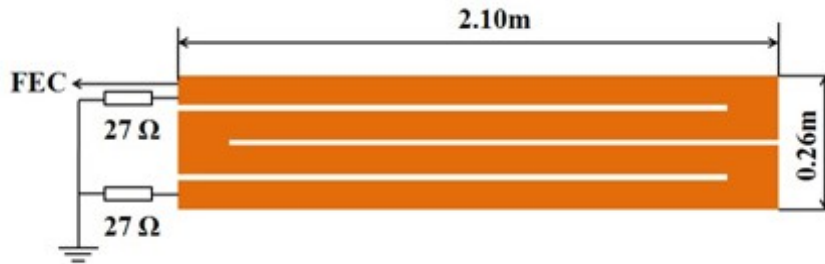


图 3.9 大亚湾“Z”型读出条设计

3.3.3 匹配电阻

按照传输线理论，对于图 3.10所示的情况，有反射系数公式(3.6)和传输系数公式(3.7) [61]。

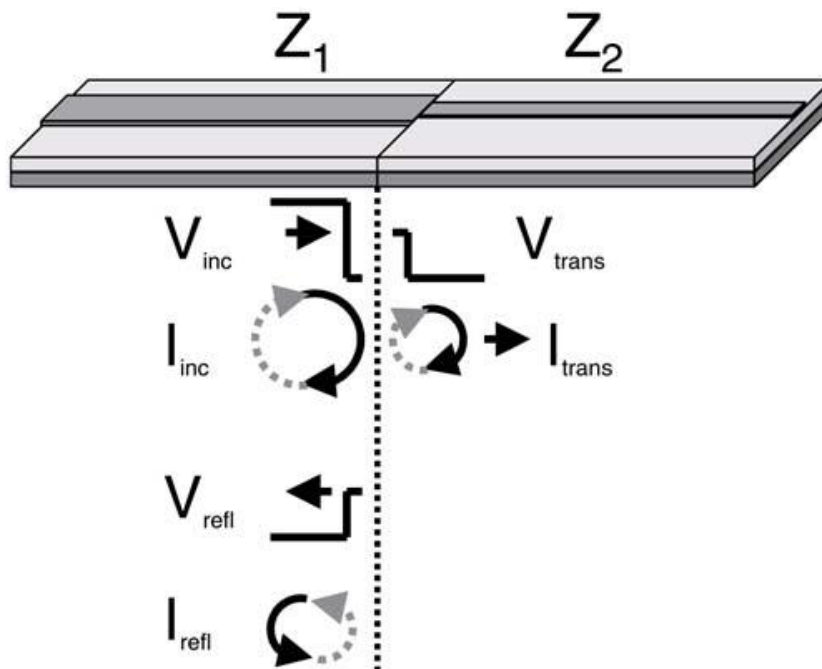


图 3.10 入射信号穿越分界面示意图

$$\rho = \frac{V_{refl}}{V_{inc}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.6)$$

$$t = \frac{V_{trans}}{V_{inc}} = \frac{2 \times Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3.7)$$

根据公式(3.6)当匹配电阻 Z_2 跟读出条特性阻抗 Z_1 相等时，反射系数 ρ 为0，入射信号被完全吸收。当匹配电阻值 Z_2 小于读出条特性阻抗 Z_1 时反射系数 ρ 为负，即反射信号跟入射信号方向相反，极限情况是当读出条与地（准确的说是信号返回路径）短接时，此时匹配电阻 Z_2 为0时，反射系数为-1，反射信号跟原始信号大小相同、符号相反、方向相反、返回源端。当匹配电阻大于读出条特性阻抗时反射系统为正，即反射信号跟原始信号同向，极限情况是当读出条末端没有连接任何终端时，匹配电阻为 ∞ 时，反射系数为1，反射信号跟原始信号跟原始信号大小相同、符号相同、方向相反、返回源端。

读出条的特性阻抗可以通过以下简单的公式得到[56]:

$$Z_L = \frac{60 L n \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right)}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}, (w/h < 1)$$

$$Z_L = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}} \left[\frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 L n \left(\frac{w}{h} + 1.44 \right) \right]}, (w/h \geq 1) \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{2}(\varepsilon_r + 1) + \frac{1}{2}(\varepsilon_r - 1) \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

h 是读数条的厚度， w 是读数条的宽度，通常情况下 w/h 远远大于 1， ε_r 为读出电极之间介质的介电常数（即两根相邻的读出条之间介质的介电常数）， ε_{eff} 是修正读数条边缘效应（包括空气及基座的散射场等）之后读出电极之间介质的有效介电常数。

对于 $8.4 \text{ m} \times 6.5 \text{ cm}$ 的读出条（即“Z”型读出条的等效）， $w = 6.5 \text{ cm}$ ， $h = 0.035 \text{ mm}$ ，基于(3.8)式编写代码（见附录 1）可以计算有效介电常数在[1,10]范围内对应的读出条阻抗（通常计算中选择阻性板的介电常数为 3，气体的介电常数为 1），结果见图 3.11。可以看到计算得到的读出条阻抗范围与实验测得的“Z”型读出条阻抗 27Ω 差距较大。因此在实验

上更多是采用电阻扫描的方法测出读出条的特征阻抗。

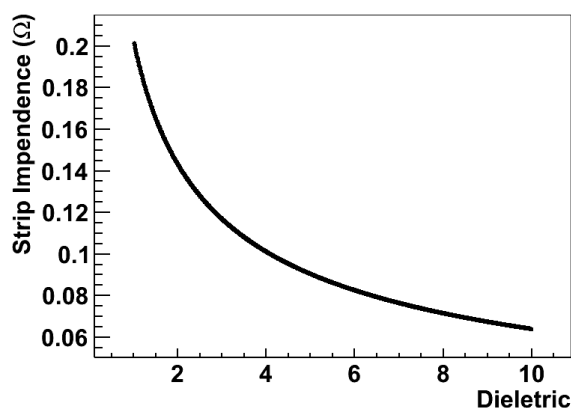


图 3.11 有效介电常数在[1,10]范围内对应的读出条阻抗

3.3.4 工作气体

合适气体比分的标准就是有高的探测效率，以及低的计数率和暗电流。如果只是后者满足，前者却是探测效率低，这样的气体比分也是难以满足要求的。北京谱仪的阻性板室工作气体包括氩气 (Ar)、氟利昂 R134A ($C_2H_2F_4$) 和异丁烷 (iso-butane)。氩气是电离气体，主要作用是在带电粒子通过氩气时在探测器内部产生离子-电子对，电子经过漂移和雪崩来产生雪崩和流光信号。氟利昂作为一种负电性的淬灭气体，通过吸收电子抑制流光信号进一步发展成为打火信号（从本质上讲阻性板室的流光信号也是一种放电形式，只是由于阻性板室的电极是石墨电极而不是金属电极，使得其电容较小不易积聚电荷形成大信号的放电，这个特征使得阻性板室的流光信号与其他气体探测器如 MicroMegas 的有所区别 [62]）。有关实验表明，氟利昂在阻性板室内部高压放电的条件下产生微量的氟化氢 (HF) 气体，该气体溶于水蒸汽分子形成氢氟酸 [63]（由于使用的尼龙气管会吸收空气中的水分，使得工作气体中掺杂中少量的水蒸汽），腐蚀破坏阻性板室的内表面。特别是氟利昂是一种温室气体，氟利昂的使用会臭氧层造成破坏，因此从减缓探测器老化和保护臭氧层的角度考虑，尽可能少的减少氟利昂在混合气体中的比分。异丁烷作为电中性气体，主要用来淬灭阻性板室探测器流光模式下形成的紫外光子。另外，它还是是一种易燃易爆气体，如果泄露到空气中，有可能与空气混合形成爆炸性混合物，因此在允许的情况下尽可能的减少其比分含量。

如图 3.12[50]所示氩气比分过高则会降低影响坪区效率（第 1 组：54-36-10），无法满足实验要求，过低则会使坪曲线右移（第 7 组：32-62-8），这会使得工作高压偏高，导致

高压绝缘防护（如 Mylar 膜和高压电缆）和高压设备的费用增加。另外一个需要优先考虑的因素是异丁烷含量，尽管提高异丁烷的含量可以在较低的高压下就可以上坪，但是其是可燃性气体，出于安全考虑需要在满足效率要求的情况下尽可能降低其含量，因此第 5 和 6 组（42-44-14 和 40-46-14）情况被排除。由于 R134A 作为氟利昂气体，成本较高，因此从降低成本和减缓阻性板室老化的角度考虑也需要降低其含量，因此第 4 组（46-44-10）情况也被排除。剩下第 2 和 3 组（52-40-8 和 50-42-8），出于优先选择高效率情形，最后选择工作气体比分为 Ar: R134A: iso-butane = 50: 42: 8。

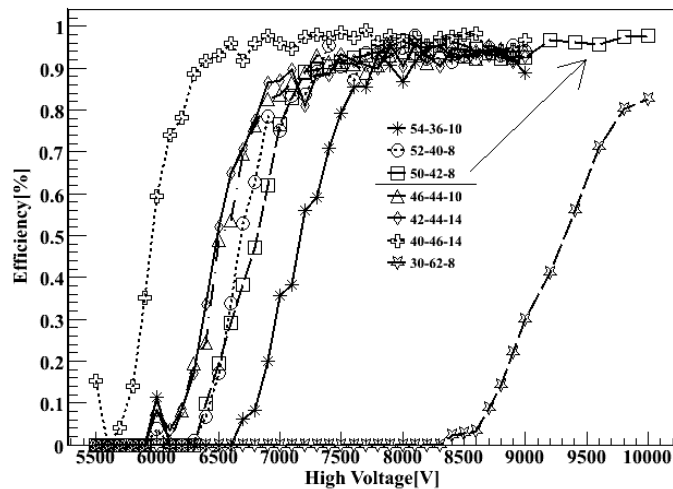


图 3.12 北京谱仪不同气体比分下阻性板室的效率

北京谱仪的长期运行证明在此气体比分下阻性板室探测器的性能稳定。但是由于大亚湾实验厅位于地底下，通风环境远不如北京谱仪良好，气体排放这就要求提高气体安全性，确保万无一失。来自普林斯顿大学的陆昌国老师建议将异丁烷的气体比分降到 4% 左右 [64]，如此可以有效保障气体使用的安全性（与大亚湾实验类似，Opera 实验中阻性板室探测器的异丁烷比分也是 4%）。

根据实验测试结果，如图 3.13 显示，在异丁烷含量为 4% 的新的气体比分下，效率和噪声率坪曲线形状与北京谱仪类似，且坪区部分在重叠一起，因此结果初步表明即使异丁烷降到 4% 也是可以保证阻性板室的工作性能。因此在裸室测试期间，使用的气体比分是 Ar: R134A: iso-butane = 53: 43: 4。

但是后来经过深入研究进一步优化气体成分和比分，加入了 SF_6 气体。这种气体在电气工业利用其很高介电强度和良好的灭电弧性能，用作高压开关、大容量变压器、高压电缆和气体的绝缘材料。根据测试结果最终选择大亚湾正式运行时使用的气体比分[46]是 Ar:

R134A: iso-butane: $\text{SF}_6 = 63.5: 30: 4: 0.5$ 。值得注意的是，为了保持裸室测试条件的前后一致，裸室测试使用的气体比分始终没有改变。但是模块测试使用的气体比分则是和正式运行的一致。

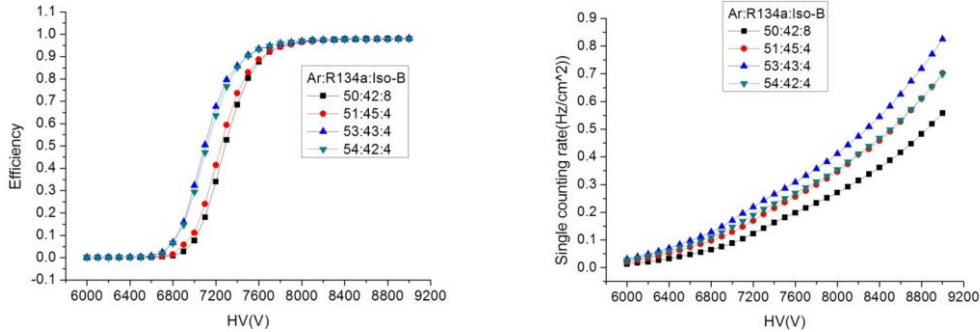


图 3.13 异丁烷含量为%4 的工作气体下阻性板室效率和噪声率坪曲线

3.3.4.1 模块设计

3.3.4.2 模块层数

为了减少阻性板内部的垫片（spacer）和边框造成的死区和提高安全系数，在北京谱仪这种高计数率应用场合下，阻性板室模块采用两层裸室组成一个模块的超层结构（super module）。如图 3.14 所示，每个模块内部有两个相互错开垫片和边框的裸室，加上两个裸室共用的一层读出条，外部是厚度为 30 mm（加上铆钉是 32 mm）的铝盒。

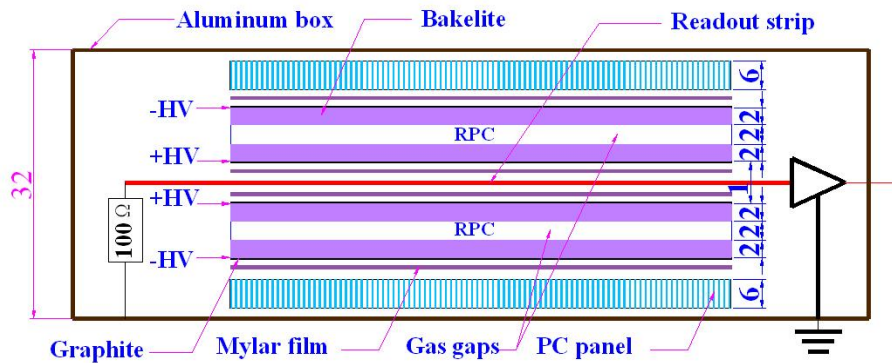


图 3.14 北京谱仪超层组件内部结构图

但是对于大亚湾这种低计数率（远厅 μ 子的计数率为 0.045 Hz/m^2 ）的实验，考虑到阻性板室自身的噪声率（正常运行时约为 500 Hz/m^2 ）导致偶然符合偏大（偶然符合率 $= 2f_1f_2T_s = 2 \times 500 \text{ Hz/m}^2 \times 500 \text{ Hz/m}^2 \times 150 \times 10^{-9} \text{ s} = 0.075 \text{ Hz/m}^2$ ），显然这种超层结构无法满足大

亚湾实验需求的。为了提高 μ 子鉴别效率，四层裸室组成一个模块，假设每层效率相同，利用以下公式可以估算模块 μ 子的探测效率：

$$\varepsilon_{m/n} = \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot \varepsilon^i \cdot (1 - \varepsilon)^{n-i} \quad (3.9)$$

是 $C_n^i = n!/(i!(n-i)!)$ 是二项分布系数， n 为模块内部的层数， m 为符合测量的层数， ε 为层效率， $\varepsilon_{m/n}$ 表示在 n 选 m 的效率，对应的触发逻辑称为 n 选 m 的触发。与此对应的是假定各层噪声率相同下可按以下公式计算偶然符合率：

$$R_{3/4, Acc} = \frac{1}{T_s} \sum_{i=m}^n i C_n^i (f A T_s)^i (1 - f A T_s)^{n-i} \quad (3.10)$$

其中 T_s 为过阈甄别后展宽得到的信号宽度，取其典型值 150 ns， f 为模块的层噪声率，取其正常工作的指标 1000 Hz/m²， A 为阻性板室层面积，近似等于 4.41 m²。大亚湾近厅的 μ 子通量是 0.88 Hz/m²，远厅的是 0.046 Hz/m²。 μ 子触发率表示真实 μ 子事例占总触发事例的比率，近点死时间是指 1ns 内因阻性板室的触发造成的死时间（每次触发开 200 μ s 的反符合时间宽度）。

表 3.1 不同触发模式下模块的性能比较

触发模式	2/2	2/3	2/4	3/4	4/4	4/6	5/6	6/6
效率 (%)	90.25	99.27	99.95	98.60	81.45	99.78	96.72	73.51
噪声 (Hz /m ²)	1.20	3.60	7.20	0.004	8.60×10^{-7}	1.30×10^{-5}	3.90×10^{-9}	4.70×10^{-13}
近点 μ 触发率(%)	42.31	19.65	10.90	99.51	99.999	99.999	99.999	99.999
远点 μ 触发率(%)	3.69	1.26	0.63	91.42	99.998	99.972	99.999	99.999
近点死时间比率	0.052	15.55	31.08	0.02	3.73×10^{-8}	5.59×10^{-7}	1.68×10^{-10}	2.02×10^{-14}
远点死时间比率	0.078	0.233	0.466	0.028	5.60×10^{-8}	8.39×10^{-7}	2.52×10^{-10}	3.02×10^{-14}

表 3.1 列出了不同触发模式下模块的性能，可以看到模块包含的层数越多使得能够符合的层数越多，这样偶然符合产生的触发也随着降低，同时系统的冗余度也相应提高，但是探测器和电子学的成本也随之升高。在满足实验目标的情况下，如图 3.15 所示，为了确保探测器具有一定的冗余度选择 4 层最为合适。此时 3/4 触发模式下的偶然符合率和远厅的宇宙线 μ 子通量是处于同一个数量级。

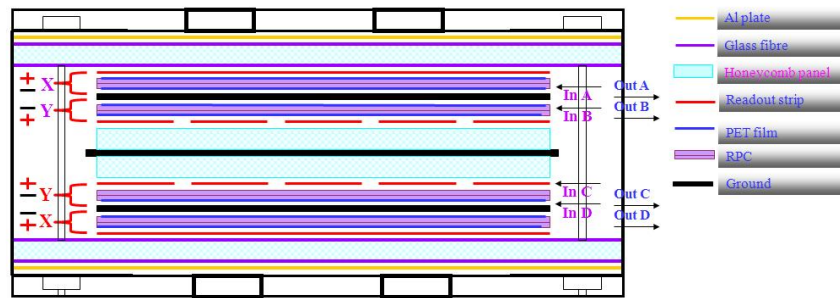


图 3.15 四层结构的阻性板室模块

3.3.4.3 裸室和读出条的摆放

由于生产阻性板的机器尺寸限制，生产的阻性板最大尺寸约是 2.4 m 长和 1.2 m 宽。考虑到裸室和模块边缘存在死区，为了降低成本，需要减少模块的个数，所以每个模块每层有两个裸室组成。如此会引入同层的两个裸室之间的死区。为此一个巧妙的设计如图 3.16 所示，将裸室制作成一大一小，层与层之间大小裸室放置位置相反，这样把原本重叠的死区（2.1 m × 0.024 m），交错开来，确保每个模块至少有两层可以进行有效探测。小的裸室尺寸是 1.0 m × 2.1 m，大的裸室的尺寸是 1.1 m × 2.1 m。为了能够重建 μ 子的径迹需要采用二维读出，从下往上数，第 1 和 4 层为 X 方向读出，第 2 和 3 层为 Y 方向读出。值得注意的是，每层覆盖两块尺寸相同基于玻璃纤维材质（FR4）的铜条读出板，每块读出板有 4 个“Z”型读出条。

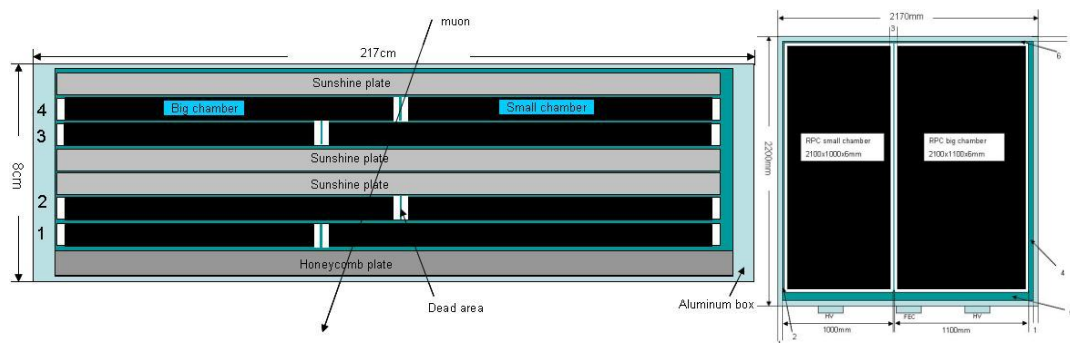


图 3.16 模块内部各层裸室摆放

3.3.4.4 模块结构

根据前面的设计加上机械方面的考虑，模块的最终结构如图 3.17 所示，整个模块分为上下对称的两部分，中间是两块阳光板夹着一个干净地层。以干净地层下面部分为例，最底层是一层蜂窝板，起到机械支撑和缓冲的作用。紧接着在上面覆盖第 1 层的两块读出板和两块裸室，然后在裸室上面放置作为第 1 和 2 层裸室共用的读出条信号地层。在此地层上放置第 2 的裸室和读出板。从科学研究角度考虑，这样的设计就差不多了。但是从工程学角度看，为了确保探测器的抗震性（需要将模块用货车从北京运输到两千多公里外的深圳）、可靠性和长期运行的稳定性考虑，还需要添加一些冗余措施。比如每个信号层或者地层在与模块的其他部位存在可能接触的地方，都覆盖了绝缘 Mylar 膜（一种聚酯薄膜，又叫麦拉纸）用于分隔和保护，以防出现打火放电或是脏地（模块的外壳是脏地）和干净地（clean ground）相连。另外各层裸室的边缘与模块之间的空隙都塞入黑色橡胶块进行固定，以免运输和模块吊装过程中裸室出现移位和磕碰造成损伤。即便如此，从后来模块的安装和试运行出现的问题来看，模块结构方面仍有大量的地方需要改善，后面会详细讨论。

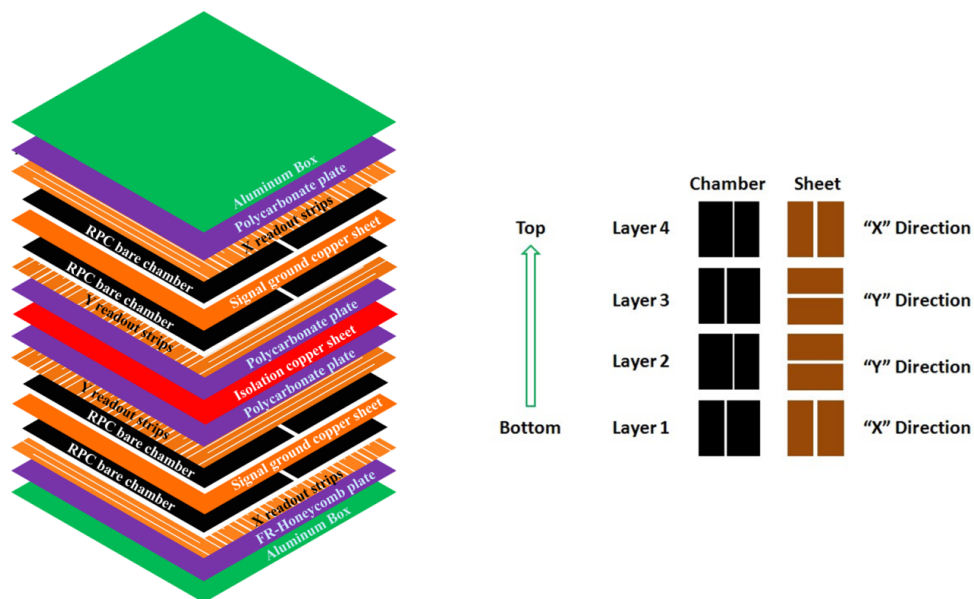


图 3.17 模块内部结构

3.4 北京谱仪和大亚湾实验的阻性板室探测器比较

由于实验需求不同，不可能将北京谱仪的阻性板室设计结果直接搬到大亚湾实验使用，必须有所创新、优化和改进，才能满足大亚湾实验设计目标。表 3.2 列出了应用在这

两个实验的阻性板室探测器在性能指标、体电阻率、读出条尺寸、气体、模块结构和读出方式等方面的不同之处。

表 3.2 北京谱仪和大亚湾实验的阻性板室探测器模块设计指标比较

设计指标	北京谱仪	大亚湾
效率指标	$\geq 95\%$	$\geq 95\%$
噪声率指标	$\leq 1000 \text{ Hz/m}^2$	$\leq 1000 \text{ Hz/m}^2$
暗电流指标	$\leq 1 \mu\text{A/m}^2$	$\leq 10 \mu\text{A/m}^2$
体电阻率	$0.2 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm} \sim 2.0 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$	$0.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm} \sim 2.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$
读出条尺寸	30 ~ 60 mm	2.1 m 长 $\times$ 0.26 m 宽
读出条形状	条形	“Z”字形（等效为 8.4 m $\times$ 6.5 cm 的条形）
气体	氩气、氟利昂和异丁烷	氩气、氟利昂、异丁烷和六氟化硫
气隙宽度	2 mm	2 mm
模块结构	2 层	4 层
读出方式	两层裸室采用或读出方式	3/4 触发

3.5 本章小结

本章首先介绍阻性板室探测器的工作原理，紧接着介绍了北京谱仪和大亚湾实验的阻性板探测器设计目标，再接着根据大亚湾的物理目标，基于阻性板室探测器在北京谱仪的成功应用，确定大亚湾实验中阻性板室体电阻率要求的控制范围是 $0.5 - 2.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 、面电阻率要求的控制范围是 400 - 1000 k $\Omega/\square$ ，读出条采用 2.1 m $\times$ 0.26 m 的“Z”型结构、气体比分是 Ar: R134A: iso-butane: SF₆ = 63.5: 30: 4: 0.5 和模块触发方式是 3/4 触发，并在最后陈述了两个实验用的阻性板室探测器设计指标的不同点。

第四章 阻性板室探测器的宇宙线测试

宇宙射线，指的是来自于宇宙中的一种具有相当大能量的带电粒子流，但是在经过与地球大气层的碰撞后产生各种各样的次级粒子。而能够到达地面的次级粒子主要成分是 μ 子。因此阻性板室探测器的测试实际是利用 μ 子作为入射粒子，来对生产的裸室进行必要的质量检验。本章将介绍大亚湾阻性板室探测器包括裸室和模块的宇宙线测试的准备工作、方法和流程，以及测试结果。

4.1 测试准备工作

一个裸室的宇宙线测试前的准备工作包括裸室高压连接器的制作和老练两个部分。由于从工厂运送过来的裸室，并没有安装高压连接器，因此第一步是首先为裸室制作高压连接器。其次是对裸室进行老练来改善裸室的性能。

4.1.1 裸室高压连接器的制作

高压连接器是由气嘴、导电铜带、结构胶和高压插针组成，其中高压插针是由铜质管状针身和镀金针头（早先是使用镀银针头，为了更易于焊接改为镀金针头）两部分构成。为了保证高压针头的焊接质量，在铜管上用钻头打个小孔。这样焊锡受热时具有较大的流动性，可将插针和铜管牢牢的粘接在一起。

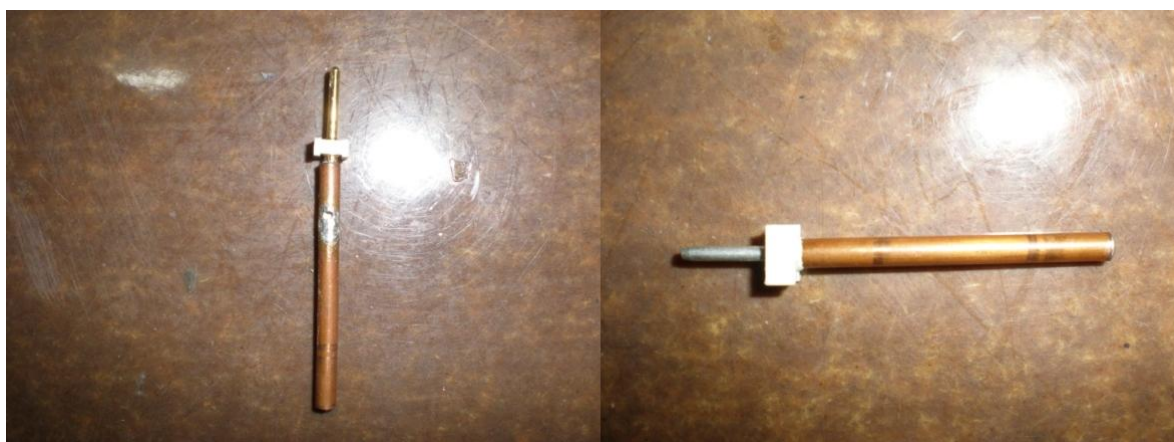


图 4.1 镀金和镀银插针的实物图

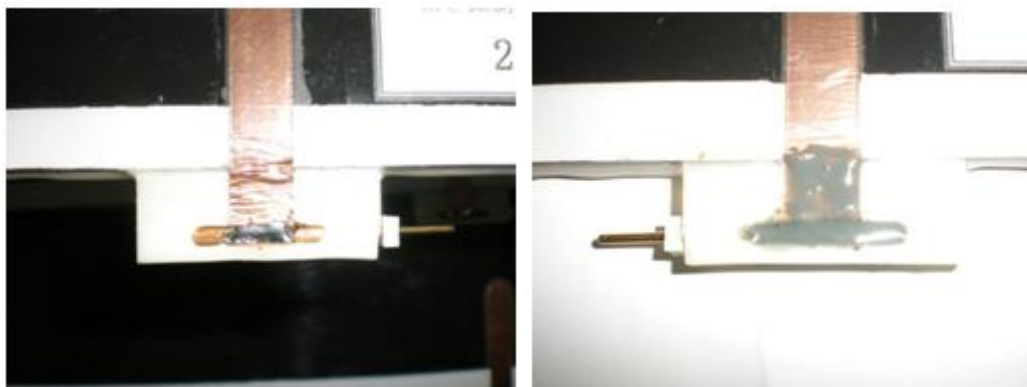


图 4.2 插针焊接和涂胶

阻性板室探测器裸室高压连接器的制作工艺：

一、 高压插针的制作工艺

1. 将铜管截成 33mm 长，并用细棉花蘸上酒精清洗任意一端的内部杂质和氧化层；
2. 将插针长端插入电路板任意孔中，短端均匀镀锡；
3. 将清洗过内部氧化层铜管的那端插在插针的短端上（靠着孔那端）；
4. 将一截大约 2cm 的锡焊放入铜管内；
5. 用 150W 的烙铁紧贴铜管下部适当时间，将其铜管内部焊锡熔化，拿掉烙铁。另一只手尽量保持其铜管位置尽量竖直，并待其内部焊锡再次凝固将插针焊牢；

二、 高压连接器的制作工艺

1. 用砂纸去除高压插针铜管外部氧化层，并用酒精清洗；
2. 将裸室两端高压连接器的透明胶纸去除，注意不要伤到铜带；
3. 将铜带拉平铺到高压连接器的插槽内，注意铜带下端与裸室接缝处多余的胶需清理干净；
4. 将高压插针插入插槽内压住铜带，并将多余铜带去除，注意焊接前一定要检查插针的方向；
5. 焊接高压插针，注意焊锡以盖住铜管为宜，不能有虚焊，并且要求平滑不能有凹凸及尖状的毛刺等；
6. 涂胶时，将 DP190 胶挤出并用细棍搅拌均匀，并用细棍挑出适量的胶将高压连接器的插槽涂满并均匀的涂抹在铜带上。

7. 注意胶尽量涂抹覆盖全部铜带，包括其边缘，且涂胶的高度尽量与高压连接器保持一致，铜带上的胶尽量薄且均匀，最后多余的胶可用软纸擦干净；

4.1.2 裸室的老练

老练，其英文名为 **training**，其含义是指裸室在进行宇宙线测试前，在通纯氩气的条件下对其持续加高压的行为。由于新制作的裸室（或者因不合格进行复测的裸室）内表面灰尘、毛刺较多，如果不经过老练直接进行测试，一方面暗电流、单计数率很高，导致输出的信号幅度较大，有可能把前端的甄别器烧坏，另一方面裸室的效率较低。这是因为高计数率使得放电区域过大，探测的死时间增大，这使得单位面积的死区增大，效率降低。这使得老练作为裸室测试前的一个必不可少环节。

4.1.2.1 老练过程

老练的过程具体如下：

1. 换气：首先在架子的同一层堆叠 8 块裸室，因为加高压的缘故，相互间用泡沫进行隔开。然后 8 块裸室在气路上进行串联。一般说来，假设每块阻性板室内部的体积为 4.5 L，则 8 块阻性板室的体积共 36 L。如果纯氩的流量是 100 sscm，那么是在通气 12 个小时之后，总通气量达到 72 L，这样可以保证每块阻性板室至少进行了两个体积的换气。但实际上，由于测试任务的紧迫，会将纯氩的流量加到 200 sscm，这样可以减少换气时间。这自然可以提高老练效率，改善老练效果。

2. 加高压：在进行充分换气后对裸室加 10 kV 的高压。老练使用的高压设备 CAEN 的 SY127 高压机箱及其配套高压插件，主要是使用+4 kV 和-6 kV 的插件，最大的工作电流一般是 1 mA。通过基于 RS232 传输协议的串口线，个人计算机借助视窗操作系统自带的超级终端，可以远程连接监测控制高压机箱。一个值得注意的情况是，由于没有淬灭性气体的加入，使得阻性板室的暗电流非常大，往往可能超过 1 mA，超过了插件最大的允许电流，使得高压不得不过流（trip）。

4.1.2.2 老练软件

虽然超级终端可以方便快捷进行人工监测，但是并不能很好满足裸室老练的需要。主要原因包括以下几点：

1. 由于在测试过程中，时常会出现某块裸室的暗电流超过最大的工作电流。因此需要

手动将过流的那路高压 V_0 值降低 500 V 后，再重新打开高压，这样使得裸室暗电流低于 1 mA，不再过流。这就要求值班人员每隔两小时巡查一次，但是如果电流过流发生在晚上，则只好等到次日早上值班员巡查时才能解决。因此这会极大浪费资源和宝贵的时间，影响测试进度。

2. 因为需要将老练过程各路的高压和暗电流记录下来，作为日后查询的依据。因此要求值班员每隔两小时按照固定的格式进行一次记录，包括高压、暗电流、温湿度和气压等参数。由于是大批量生产裸室，这就造成这方面的工作量极大，任务极其繁琐。如果能将相关的高压和暗电流值进行自动保存，将极大的把人从这类繁琐的任务中解脱出来。

由于视窗操作系统自带的超级终端是一个不开放源代码的软件，因此无法在此基础上做二次开发。考虑到 LabVIEW（虚拟仪器）是一个非常适合面向硬件的开发软件，可基于它快速开发出监控软件。

针对上述几点，该软件实现的功能包括：

功能 1：每隔一段时间（如一分钟）自动扫描各路高压，检查发现是否有过流的高压通道。若是存在，则在原来设定的 V_0 基础上减去 50V（可设置）后，重新加载该路高压。若是重新加载后依然过流，则再减去 50 V。如此可在当该路高压不再过流时，暗电流值最接近 1 mA（如暗电流值在 996 μA ）。一个特别的情况是，阻性板室的暗电流会随着加载高压的时间，先增大后减少。

功能 2：由于上述功能对高压操作是单向性的，只能减少高压，不能增加。因此在阻性板室的暗电流开始下降后（如暗电流值在 750 μA ），对应的高压值因为先前过流的缘故已经被降低到某个数值（如负高压只加到 -4 kV）。但实际上，如果此时将高压值加满，很有可能还会过流。因此要求实现这么一个功能：当阻性板室探测器的暗电流开始下降时，能够自动升高压。但是直接实现该功能的算法较为复杂。因此可以换一种思路达到该目标：预先将各路的高压最大值保存到一个文件，然后每隔一段时间（如 2 小时）读取它，将各路 V_0 值设定为最大值。完成该操作后，如果某一路高压过流，利用功能 1 调节高压。若还是过流，则再调用功能 1。如此可使得在不过流的前提下裸室的暗电流处于最大值。

可以将各路的高压，暗电流按照规定的格式自动保存下来，具体格式如下图所示。

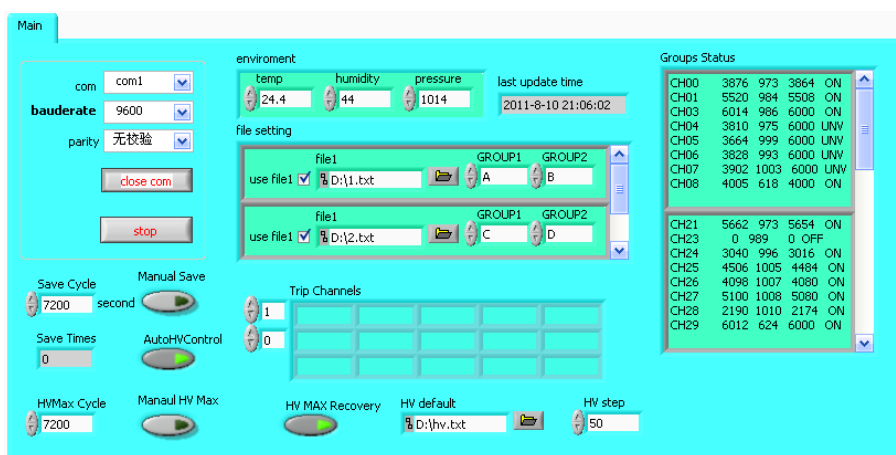


图 4.3 裸室老练软件界面

利用 LabVIEW 自带的范例 Advanced Serial Write and Read.vi，首先实现与 SY127 的串口通讯。其次在此基础上根据需求开发相应的软件。软件开发的难点在于如何将获得的字符流根据需要分割提取信息。

值得注意的是，如果基于 LabVIEW 做串口通讯的软件开发，还需要进一步安装 NI-VISA 驱动，这个驱动可以在 NI 公司的官方网站免费下载。不然在程序关闭串口时会弹出显示错误的对话框，错误的代码是-1073807202。同时如果先前已打开超级终端与 SY127 进行通讯过，请务必断开超级终端与 SY127 的连接，否则也会弹出错误的代码是-1073807202 的对话框。

4.1.2.3 老练时间和效果

根据研究结果发现，在阻性板室老练过程中裸室的暗电流是先增加后减少，如下图所示。这是因为在暗电流上升过程中，由于阻性板室内表面的毛刺、灰尘和杂质较多，导致尖端放电现象频繁出现，可以听到如同下大雨时雨滴落到瓦棚时的声音。同时频繁的放电产生的热量使得裸室温度升高，体电阻率下降[65]，根据欧姆定律这使得裸室的暗电流上升。随着老练过程的进行，阻性板室内表面的毛刺、灰尘和杂质逐渐减少，内表面趋于平整。这就使得尖端放电现象出现的频率降低，暗电流也就随之下降[26]。从图 4.4 来看，经过了 32 个小时后，暗电流达到最高点，之后开始下降，再经过 14 个小时（即老练了 56 个小时后）暗电流趋于稳定。综合整个测试的进度，选择老练时间为 48 个小时。但是后期制作的裸室，由于内部的毛刺和杂质较多，48 小时的老练时间已经不够用了，只好根据暗电流开始下降后再老练 12 小时。

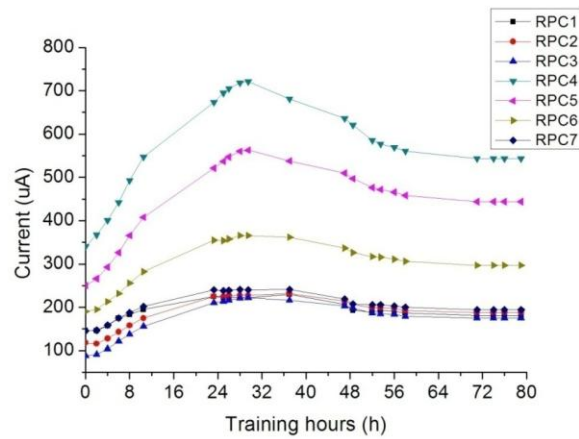


图 4.4 裸室老练过程暗电流随时间的变化趋势

4.2 裸室的测试方法

4.2.1 裸室测试系统搭建

一套低廉、稳定和可靠的测试系统对于裸室的长期批量测试是必不可少的。如图 4.5 所示，这套系统包括气体系统、高压系统、触发系统、读出系统、电子学系统和数据获取系统 6 个组成部分。

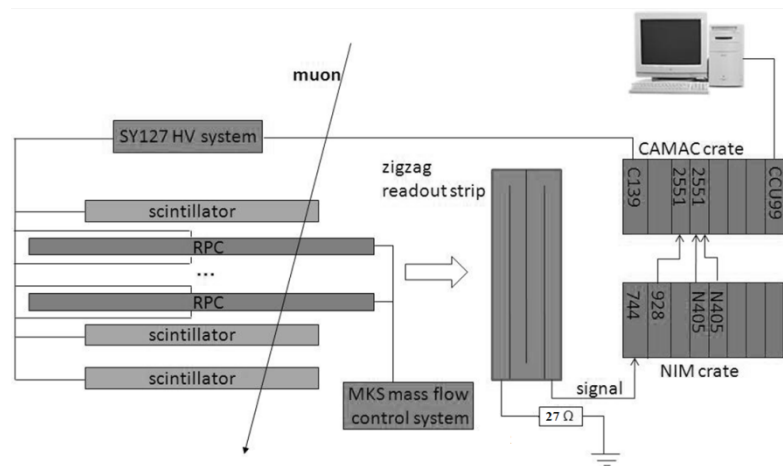


图 4.5 裸室的宇宙线测试系统示意图

4.2.1.1 气体系统

前面提到裸室测试时采用的工作气体成分是氩气 (Ar)、氟利昂 ($C_2H_2F_4$ 或叫 R134A) 和异丁烷 ($i-C_4H_8$)，气体比分为 106 sscm:86 sscm:8 sscm。配气设备采用的是 MKS 公司的质量流控制器 (Mass Flow Controller, MFC)，如图 4.6 所示。

由于质量流控制器老化的缘故，需要在使用前对其进行刻度校正。所使用的工具是皂沫流量计。具体操作如下：将某一组分的气体出口与流量计的下端连接，然后通过计时来算出每分钟气体流量（一般测 3 次得到平均值），然后调整流量计前面板的示数，使之与计算结果符合。一个技巧是由于异丁烷的流量较低，气泡上升时间较长，可以在测试完氟利昂的气体流量后，将两路气体混合后再测总的气体流量，所以：

异丁烷的气体流量 = 总的气体流量 - 氟利昂的气体流量。

这样做的好处是减少测试时间。刻度完后就可以将混合气按照预定的比例送入裸室。混合器的气体流量是 200 sscm，若每块阻性板室内部的体积为 4.5 L，则 5 块阻性板室的体积共 27 L。如果通气 5 个小时，换气量达到 60 L，即 5 块裸室至少更换了 2 个体积的气体。但在裸室的实际测试中，将需要测试的裸室串联在被测试的裸室气路后面来完成换气的。而裸室的测试时间刚好是 5 个小时，这样两轮裸室测试之间可以实现无缝连接。

4.2.1.2 高压系统

高压系统采用 CAEN 公司的 SY127 机箱以及配套的高压插件(+4 kV 和-6 kV 的插件)，负责给裸室和触发系统的光电倍增管提供高压。这套系统基本是和老练所用的系统基本相同。唯一的区别是个人电脑除了通过串口线连接 SY127 外，如图 4.7 所示，个人电脑还可以通过 ISA 总线（(Industry Standard Architecture，工业标准体系结构）与 CAMAC 系统的插件 C139 连接，C139 再通过 Lemo 线与 SY127 高压机箱连接。其中前者是起到辅助作用，而后者在测试中发挥主要作用。关于这方面的内容会在后面的数据获取系统部分详述。



图 4.6 测试所用的 MKS 质量流控制器



图 4.7 插件 C139、CCU99 和 ISA 总线的实物图

4.2.1.3 触发系统

如图 4.8 所示，触发系统是由 3 块上下对齐的 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 塑料闪烁体耦合光电倍增管（photomultiplier，简称 PMT）组成，其中一块闪烁体放置在架子的最上方，另外两块放置在架子的最顶部。光电倍增管的工作高压均为 2050 V 。3 块闪烁体的信号耦合后能得到一个信号，即可认为 μ 子同时穿透 3 块闪烁体。利用三重符合可以极大的压低噪声，降低偶然符合的几率，同时该 μ 子也一定穿过测试的裸室。相应的如果阻性板室也能在相同的时间内给出一个信号，即认为阻性板室探测器也探测到该 μ 子。

4.2.1.4 读出系统

Z 型读出条被压在裸室的正下方，读出地位于裸室的正上方。读出条的一段与读出地之间通过 $27\ \Omega$ 电阻相连接，而另一端通过 $50\ \Omega$ 阻抗的 Lemo 信号线将信号引出。如图 4.9 所示，这是裸室测试时利用示波器得到探测器输出的原始信号。



图 4.8 裸室测试现场图

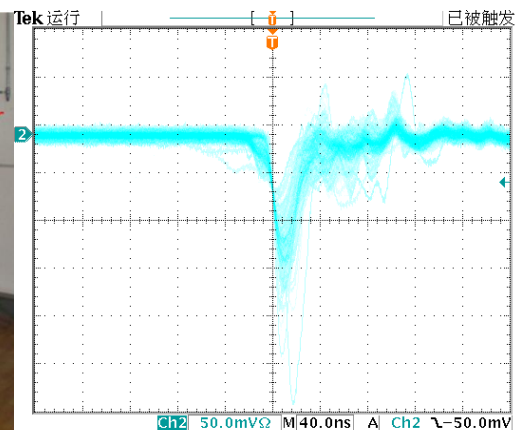


图 4.9 原始的阻性板室探测器信号

4.2.1.5 电子学系统

3 路光电倍增管的信号各自经过甄别器（discriminator）后得到 NIM 电平，再进行 3 重符合后得到一个 NIM 电平，该电平分成 2 路，其中一路送入定标器（scaler）进行计数，得到三重符合数 C_3 。前面提到一块裸室有四路读出，这 4 路读出分别经过甄别后送入符合单元进行或的符合后分成两路输出，其中一路送入定标器进行计数，得到阻性板室总计数 C 。另一路会与光电倍增管的 NIM 电平进行符合后，送入定标器进行计数，得到四重符合数 C_4 。值得注意的是，阻性板室和光电倍增管的甄别阈分别设置为 -50 mV 和 15 mV ，甄

别输出宽度分别设置为 160 ns 和 20 ns。

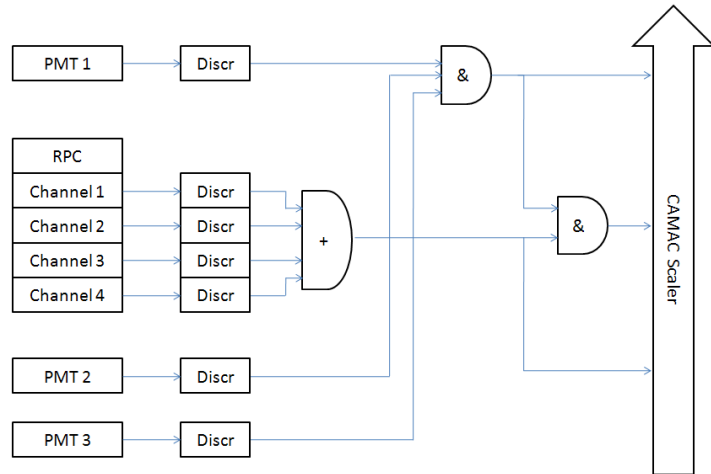


图 4.10 阻性板室探测器的测试电子学示意图

4.2.1.6 数据获取系统

数据获取系统是基于 CAMAC 系统搭建的，其中 CAMAC 系统的机箱控制器是高能所自主研发的 CCU99 插件，通过 ISA 总线与个人电脑通讯。因此需要在计算机内部安装 ISA 板卡。数据获取系统软件是基于 ROOT 开发的，运行环境是 Linux。软件主要构成的包括三部分：高压控制模块、数据获取模块和用户界面及图形显示模块。前面提到高压控制模块主要通过 CAMAC 插件 C139，间接与 SY127 机箱通讯。利用 C139 集成的控制模块，发送指令给 SY127，实现相关通道的 V0 和 I0 等值的设定，并且返回对应通道的 VMon 和 IMon（暗电流）当前值。如此通过预先设定好起始电压、结束电压、步长和步长时间，就可以实现对裸室高压坪曲线的自动扫描。数据获取模块用来每隔一段时间（100 s）读取 LeCroy 定标器 2551 各个通道的计数，这些计数包括光电倍增管的 3 重符合数、光电倍增管与阻性板室的 4 重符合数和阻性板室的单计数。用户界面及图形显示模块主要设定高压扫描模式、裸室高压加载通道等参数，并且将每轮扫描的结果（效率、暗电流和单计数率）添加到图形界面，以便值班员能及时直观了解情况和发现问题。

4.2.2 裸室合格标准和测试时间

阻性板室探测器作为反符合探测器的重要组成部分，要求对宇宙线中的 μ 子有足够高的探测效率，这样才能有效的扣除本底。根据上一章提到大亚湾阻性板室探测器的设计要求，加上必要的冗余度，因此裸室测试的标准更为严格，要求正常的工作高压下裸室的效

率 $\geq 95\%$ ，单计数率 $\leq 0.8\text{Hz}/\text{cm}^2$ ，暗电流 $\leq 10\text{ }\mu\text{A}/\text{m}^2$ 。

触发系统的触发效率大概在 17 Hz ，用 20 Hz 做近似计算，则在做 $6\text{ kV} - 9\text{ kV}$ 高压扫描，每次步长是 100 V ，每个步长停留时间为 100 s ，则 5 轮下来总的触发事例数目为 $N = 300000$ 。由于大量的入射粒子进入探测器可以看做是一个泊松分布的随机过程，则计算效率的误差 $= [\epsilon(1-\epsilon)/N]^{1/2} = 0.22\%$ 。因此得到的计算效率误差 $< 1\%$ 。

4.2.3 测试系统设置和测试流程

4.2.3.1 测试系统设置

裸室的参数设定：

设置大的裸室（AB 板和 BB 板）面积： 2.3 m^2

设置小的裸室（AS 板和 BS 板）面积： 2.1 m^2

第一层裸室的正高压通道：12 负高压通道 02

.....

第六层裸室的正高压通道：16 负高压通道 06

高压扫描模式设定：

起始高压： 6 kV

结束高压： 9 kV

步长： 100 V

其它设定：采用 3 层闪烁体耦合光电倍增管作为触发模式

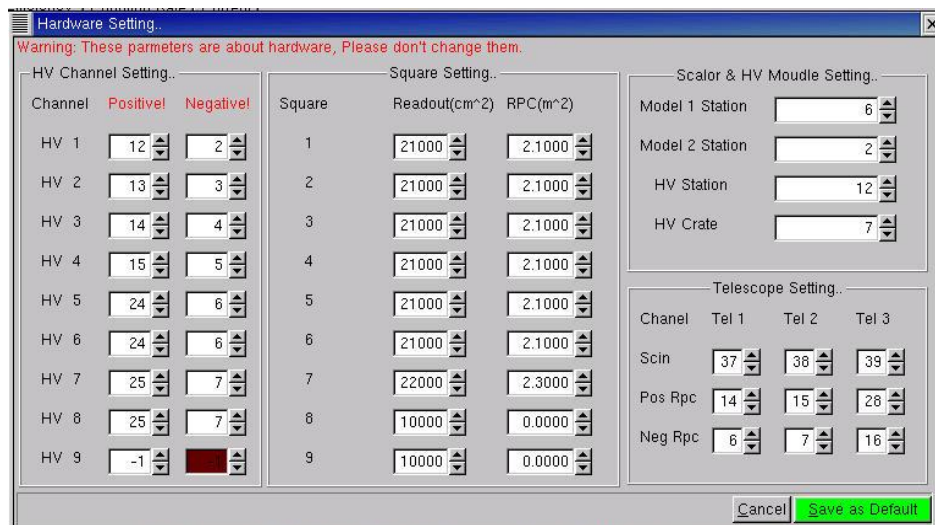


图 4.11 数据获取软件设置界面

4.2.3.2 测试流程

由于需要 1600 块合格的裸室，考虑到存在合格率的问题，所以为了保证工程进度，需要合理安排每天的进度计划。前期的裸室测试阶段，由于甄别器有足够的数量，可以保证每轮测试 6 块裸室，一天开展 2 轮测试。但是由于后期甄别器损坏情况较为严重，从每轮 6 块裸室慢慢降到每轮 2 块裸室，如果再按照前期的进度计划，势必会延误工程。因此为了保证进度，需要一天开展 3 轮测试。表 4.1 是一天开展 3 轮测试的裸室宇宙线测试流程表。

表 4.1 裸室宇宙线测试流程表

工作时间	工作任务
09:00–09:30	取下测试完的阻性板室，换上已换气的阻性板室，连接气管高压准备测试
09:30–10:00	将已老练阻性板室放入测试间并开始换气；稳定测试间温度
10:00–10:30	将待老练的阻性板室放入老练架，通气或者加高压
10:30–11:00	待测试间温度稳定，加高压检查阻性板室信号后，开始宇宙线测试
11:00–16:00	宇宙线测试
16:00–06:30	取下测试完的阻性板室，换上已换气的阻性板室，连接气管高压准备测试
16:30–07:00	将完成老练的阻性板室放入测试间并开始换气；稳定测试间温度
17:00–07:30	待测试间温度稳定，加高压检查阻性板室信号后，开始宇宙线测试
17:30–22:30	宇宙线测试
22:30–03:00	换上已换气的阻性板室，连接气管高压准备测试
23:00–23:30	待测试间温度稳定，加高压检查阻性板室信号后，开始宇宙线测试
23:30–09:00	宇宙线测试

由于设备限制，每次老练时最多只能同时老练 16 块裸室，按照 48 个小时可完成 16 块裸室来计算，大概一周最多只能完成 56 块裸室的老练。测试这边按照最坏情况打算，每轮只能完成 2 块裸室的测试，一天是 6 块，一周是完成 40 块裸室的测试。如此老练和测试之间就出现了进度不匹配。但由于老练前需要进行一段时间换气，加上后期制作的裸室杂质较多，这无疑是延长了老练时间，因此在后期实际上每周老练出来的裸室数目，勉强满足每周测试的需求数。

4.3 测试结果分析

4.3.1 裸室工作高压的选择

从图 4.12 左图可以看到, 6500 V 到 7500 V 之间效率随着高压迅速增加, 过了 7500 V 之后, 效率随着高压的增加而缓慢增长, 可以认为 7500 V 之后, 效率开始进入坪区。裸室合适的工作要求选择, 首先要求探测器的探测效率应该尽可能的高, 但是从图 4.12 中间图以看到随着高压的增加, 单计数率逐渐增大, 特别是接近 9000 V 时, 单计数率上升得更快。类似情况亦可以在图 4.12 右图看到。因此在保证一定的效率前提下, 工作高压应尽可能低, 应该尽量选择在效率坪的左端。其次为了保证效率不因高压的小范围晃动造成效率的剧烈变化, 工作高压应离坪曲线的最低端有一段距离, 这样根据工作需要调整高压的余量。因此裸室的工作高压选择 8000 V 左右较为合适。

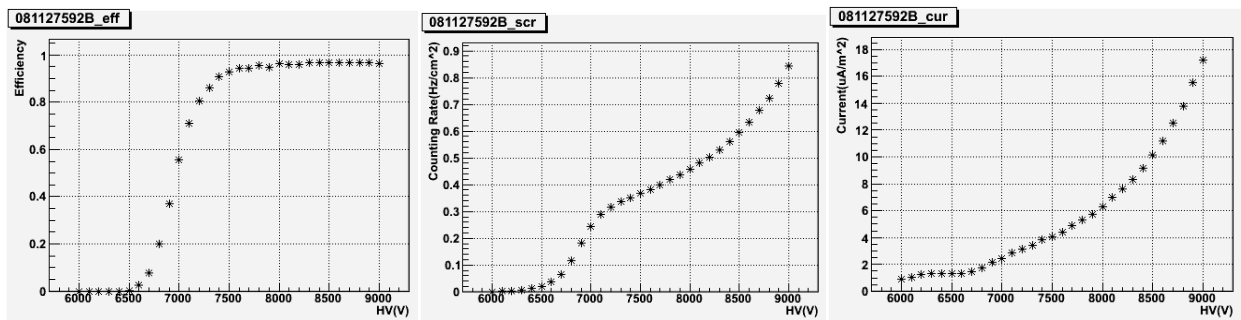


图 4.12 裸室的效率、单计数率和暗电流随高压的变化图

4.3.2 测试结果统计

如图 4.13 左图所示, 所有裸室效率的平均值在 92.7%, 这主要是由于后期制作的裸室的效率普遍偏低, 合格率不高。如表 4.2 的第三行所示, 效率大于 93% 的裸室占的比例为 87%, 效率大于 95% 的裸室占的比例为 70%。如图 4.14 左图所示, 所有裸室单计数率的平均值在 0.159 Hz/cm^2 , 远低于 0.8 Hz/cm^2 。如表 4.3 的第三行所示, 单计数率小于 0.8 Hz/cm^2 的裸室占的比例为 97%。如图 4.15 左图所示, 所有裸室暗电流的平均值在 $2.717 \mu\text{A/m}^2$ 。如表 4.4 的第三行所示, 暗电流小于 $10 \mu\text{A/m}^2$ 的裸室占的比例为 95%, 暗电流小于 $5 \mu\text{A/m}^2$ 的裸室占的比例为 87%。

从图 4.13 右图可以看到, 后期测试的 114 块裸室, 效率均值在 86.8%。如表 4.2 的五行所示, 效率大于 95% 的裸室占的比例只有 70%。从图 4.14 右图可以看到, 后期测试的裸室单计数率均值在 86.8%。表 4.3 的五行显示小于 0.8 Hz/cm^2 的裸室比例降到

89%。从图 4.15 右图可以看到，后期测试的裸室单计数率均值在 $4.724 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 。表 4.4 的第五行说明暗电流小于 $10 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 的裸室占的比例降为 83%。

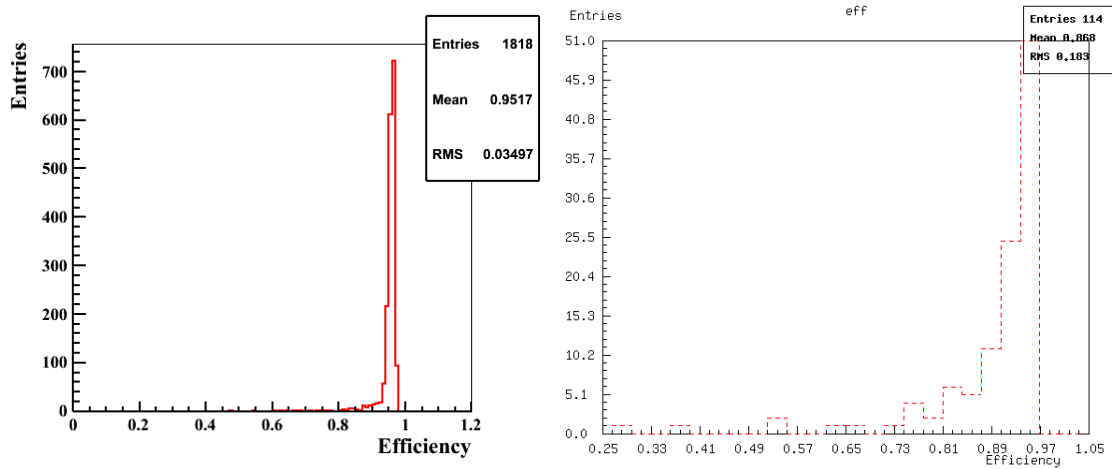


图 4.13 所有的和后期测试的裸室效率统计

表 4.2 不同效率下所有的和后期测试的裸室的比例

裸室的效率	> 93%	> 94%	> 95%	> 96%
所有裸室的数目	1607	1514	1298	779
占总数的百分比	87%	82%	70%	42%
后期裸室的数目	69	49	20	4
占总数的百分比	60%	42%	17%	3%

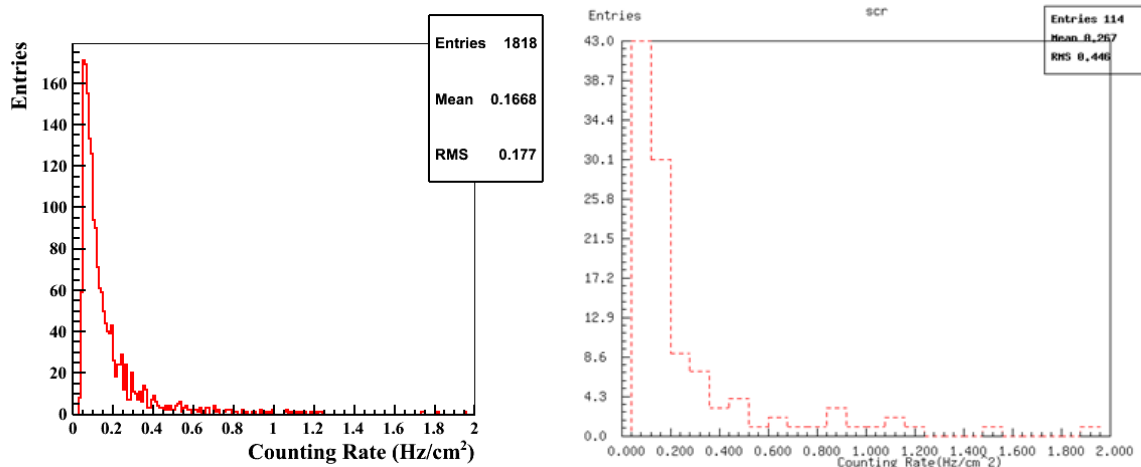


图 4.14 所有的和后期测试的裸室单计数率统计

表 4.3 不同单计数率下所有的和后期测试的裸室的比例

单计数率	$< 0.5\text{Hz}/\text{cm}^2$	$< 0.8\text{Hz}/\text{cm}^2$
裸室的数目	1764	1807
占总数的百分比	95%	97%
裸室的数目	97	102
占总数的百分比	85%	89%

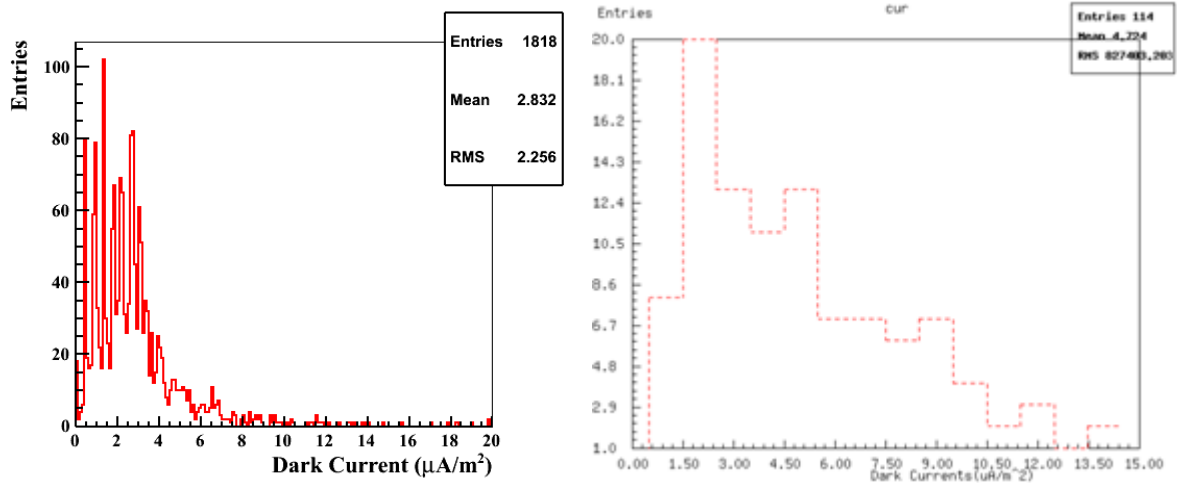


图 4.15 所有的和后期测试裸室暗电流统计

表 4.4 不同暗电流下所有的和后期测试的裸室的比例

暗电流	$< 5 \mu\text{A}/\text{m}^2$	$< 10 \mu\text{A}/\text{m}^2$
裸室的数目	1605	1770
占总数的百分比	87%	95%
裸室的数目	58	95
占总数的百分比	50%	83%

4.3.3 常见问题讨论

4.3.3.1 C139 故障

有时候 C139 无法控制 SY127，数据获取系统软件无法正常初始化。这时先查看 C139 的指示灯是否闪烁。如果指示灯不闪烁，意味着 C139 并没有正常加电。不能加电的原因，一般说来（或者很有可能）是由于 C139 的金手指被污染，有尘埃或者灰尘附在上面导致

与 CAMAC 机箱的背板接触不良。解决办法是将 C139 的金手指用酒精清洗。如果指示灯闪烁，则意味着 C139 已正常加电，但是并没有实现与 SY127 通讯。可以将 C139 的侧板打开后，仔细观察其内部印刷电路图。曾经出现的情况是，C139 的接 Lemo 线的端子与电路板之间出现断路（有可能是由于插拔时用力过大造成的）。所以将其用电烙铁重新连接即可。

4.3.3.2 甄别器故障

在整个阻性板室测试中损坏率最严重的就是甄别器。所使用的甄别器是 Phillips Scientific 公司生产，型号是 710。之所以会出现损坏严重，原因有如下几点：阻性板室探测器的输出信号过大；测试设备打开顺序有误；地线连接。正常情况下甄别器是可以承受阻性板室的流光信号，但是如果阻性板室老练不充分并且此时加载较高的高压，那么产生的大信号很有可能击穿甄别器。还有一种情况是在测试过程中，由于某一种淬灭气体流量过低（比如 R134A 已经用完），导致无法有效的遏制流光信号的发展，最后生成了大信号。测试设备正常打开顺序应为先打开气气体系统，后开电子学设备，最后打开高压机箱时，关闭时先关闭高压机箱，再关闭电子学设备（必须等到高压机箱的各个通道的 VMon 降到 50V 以下才能操作电子学设备），最后关闭气体系统。

4.3.3.3 裸室性能异常

如图 4.16 所示，两块裸室（测试前这两块裸室是串连到上一轮测试的裸室尾部进行换气的，并且上一轮测试时尾气排放正常，这首先排除工作气体通气不足的原因。）同时测试（对应的测试文件 11082421.txt），右图对应的裸室首轮高压扫描（6 kV~9 kV）效率出奇的低，随着一轮轮的高压扫描开展后，效率逐渐升高，而左图对应的裸室效率始终保持平稳。其次效率会逐渐上升，也可以排除该裸室使用的电子学问题。由于两块裸室同时测试，温湿度、地线干扰等问题都可以排除。另外在遇到过这类现象时，做过关闭高压却一直通气 5 个小时后再测试，现象还是如上。因此这种效率异常的现象只能裸室本身造成的。对于这类裸室，最终也没有找到特别好的办法解决，只能是经过数轮高压扫描后，等到其效率开始稳定后再进行测试。对于这种裸室异常的情况，基本上来自后期制作的裸室。

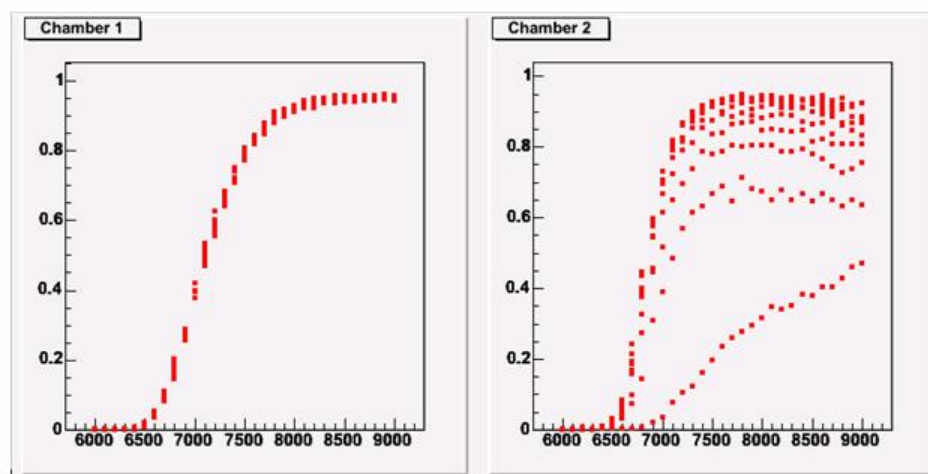


图 4.16 裸室效率异常示意图

4.4 阻性板室模块组装和测试*

4.4.1 模块组装流程与工艺要求

1. 材料准备工作

- 1.1 选室：选取待组装的 8 个阻性板室（四种型号 AS，AB，BS，BB 各两个）。要求：效率 $\geq 95\%$ ，外型平整无明显翘曲，尺寸 2100 mm $\times$ 1100 mm；2100 mm $\times$ 1000 mm，正负公差 ≤ 2 mm。
- 1.2 检漏：对每个裸室加压到 12 cm（上液面在 70 mm 位置）水柱，保持 5 分钟，压力没有明显下降（ < 1 mm，看不出液面变化）
- 1.3 高压插头检查：检查裸室的高压插针是否有松动，环氧胶是否涂得平整。
- 1.4 覆膜：四边贴耐压胶带，要求粘贴平顺严密，上下表面覆上麦拉膜。
- 1.5 信号电缆：每套 4 根，按规定尺寸剪裁，用正确方法压接，测试检查确认每根线的压接工艺良好，可靠导通，线间无短路；剥好线头，线头长 2.5~3 mm，镀上焊锡，贴好层数标签，一套一匝装箱，注意使用前的保护。
- 1.6 高压线：每套 16 根，按规定剪裁尺寸、压制高压接头，认真检查确认插头压接的各部分连接可靠，用插针试验插头插接状态，要求插接有一定连接力度，一套一匝装箱，注意使用前的保护。

* 此部分工作主要由关梦云、徐吉磊完成

- 1.7 气嘴和气管：每套进、出气嘴和气管各 4 套，按规定尺寸剪裁，气嘴连接时气管要上到气嘴连接端根部，再上紧螺纹套管。
- 1.8 读出条：每套 4 层信号读出条，认真检查读出条确认刻制良好，确认相邻读出条没有导通短路，严格检查保证每个读出条内的三条刻线内没有残余铜屑连接，特别是边上应该断开的地方。在焊接位置上镀上焊点，镀锡前用酒精擦干净铜箔表面，禁止使用焊锡膏和松香，镀锡时首先保证镀锡点与铜箔表面可靠连接，镀锡点不大于 3 mm。
- 1.9 地：拼接 3 层读出条地层，在需要焊接的位置镀上锡点，把地线焊接在地线铜箔上。要求地线焊接平整牢固，焊接时间不要过长，以免敷铜板基材过热。
- 1.10 电阻：每个电阻用热缩管套好、热缩，电阻腿长度 12.5 ± 1 mm，电阻腿漏在热缩管外用于焊接部分的长度保证 2.5 ± 1 mm。
2. 组装准备（出线口的一边为 A 面，逆时针依次为 B、C、D 面）
 - 2.1 将铝盒调运平放在水平平台上，检查铝盒四角的铆钉和底面(不打开的)铆钉是否牢固。
 - 2.2 打开盒盖，在底层蜂窝板上挖好走线槽。
 - 2.3 用橡胶圈粘接覆住铝盒 A 面各个开孔的边缘，以防伤线。
 - 2.4 用吸尘器吸掉铝盒内部缝隙以及蜂窝板上的碎末、灰尘，用酒精仔细清洁整个铝盒。
 - 2.5 布置高压线：8 根负高压线从 C 面中间引出，走蜂窝板边缘走线槽，拐弯处加螺旋管保护，沿着 C 面和 B 面内侧，引到 A 面，从右一内孔进入，从右一外孔引到铝盒外面，在进入盒内的拐角处套缠绕管。8 根正高压线分两组各四根从 A 面左右两端引出，分别从左一内孔和右一内孔进铝矩形管，从左一外孔引到铝盒外面，在左一内孔和右一内孔进口处套热缩管，并用电缆固定扣固定。
 - 2.6 布置信号电缆，第二、三层信号电缆从 B 面引出。经由走线槽，穿过 A 面内侧右一孔，从中间孔引出铝盒外；第一、四层信号电缆从 A 面引出。第四层从 A 面内侧中间孔的左侧小孔穿入铝矩形管，再从中间孔引到铝盒外面；第一层从 A 面内侧中间孔的右侧小孔穿入铝矩形管，再从中间孔引到铝盒外面。
 - 2.7 布置气管。右侧四根气管从 A 面右二内孔进入，与铝盒右侧四个气嘴用螺母连接；左侧四根气管从 A 面左二内孔进入，与铝盒左侧四个气嘴用螺母连接。

- 2.8 在铝盒 B 面和 D 面（规定面向铝盒电缆引出面，该引出面为 A 面，逆时针方向依次为 B, C, D 面）内侧覆上麦拉膜，并在每面粘上橡胶块。其中 A 面 4 个，厚度约 20 mm；B 面 4 个，厚度约 10 mm；C 面 4 个，厚度约 20 mm；D 面 4 个，厚度约 1 mm。每个橡胶块的粘接位置固定，避免和电阻及信号线之间干涉。

3. 组装流程

- 3.1 在铝盒内放置第一层读出条的信号层，信号引出端朝 A 面，读出条需完全覆盖阻性板室的灵敏区。读出条与蜂窝板之间用双面胶粘接。
- 3.2 焊接各道的信号线以及匹配电阻。
- 3.3 放上第一层裸室。左侧为 AS 型，右侧为 BB 型（第三层阻性板室放置方法与此同）。阻性板室边缘贴紧 C 面和 D 面上的橡胶块，在 A 面和 B 面橡胶块与阻性板室之间的缝隙选用适合宽度的橡胶条塞紧固定。
- 3.4 连接各块阻性板室对应的高压线和气管，连接前须确认高压线、气管与阻性板室的对应关系是否正确。仔细检查高压线连接的强度和牢固程度，如有力度不强的接头，立即更换。气管加胶时切记防止进入气管口，严防发生气管阻塞。
- 3.5 铺读出条地层，位置与信号层对齐，有焊点的两边伸出阻性板室约 1 cm。在 A、B 两边对应焊接第一、二层阻性板室各道的信号电缆地线及匹配电阻。焊接引出地线，并在焊点上加绝缘保护。
- 3.6 测量确认每根读出信号线的对地电阻为 $14.5 \pm 0.5 \Omega$ ，两根信号线之间的电阻为 $28.5 \pm 1 \Omega$ 。
- 3.7 放上第二层裸室。左侧为 AB 型，右侧为 BS 型（第四层阻性板室放置方法与此同）按照 3.3, 3.4 的方法固定并接上高压线和气管。
- 3.8 铺上第二层阻性板室的读出条信号层。读出条与阻性板室用双面胶粘接。
- 3.9 焊接第二层的各道信号极匹配电阻，按照 3.6 测量检查确认焊接情况，用 U 形管检查每层阻性板室的气密情况，方法同 1.2 裸室检漏。
- 3.10 铺上阳光板。阳光板顶住铝盒 C 面和 D 面的内侧橡胶块，并在 A 面和 B 面的缝隙塞上橡胶条固定。
- 3.11 铺屏蔽地，焊接引出地线。
- 3.12 按照 3.10 铺迪二层阳光板。

- 3.13 按照一、二层的方法安装第三四层阻性板室及读出条。
- 3.14 确认安装、焊接、布线等各道工序无误；
- 3.15 用 U 形管检查每层阻性板室的气密情况，方法同 1.2 裸室检漏。
- 3.16 加正负高压各 4 KV 测试阻性板室电流是否正常。高压上升过程中需注意电流的变化，上升过程中的电流会大过高压稳定后的电流，这时阻性板室充电电流，属于正常情况，高压在 4000 V 稳定后，每对正负高压的电流值应基本相等。如有任何异常，须检查排除。
- 3.17 铝盒盖上的阳光支撑板在读出面要削去大约 1 cm,保证支撑板不压在电阻上;盖上铝盒盖，拧上四边螺丝。

4. 工艺要求

- 4.1 安装前确保裸室型号正确，效率达标，外观良好无破损，高压插针不松动。
- 4.2 所有信号电缆，气管，高压线要求长度适宜，连接处要留有富余避免直接受力。
- 4.3 高压线用绑带和吸盘定位片与铝盒固定。走线时避免与蜂窝板、阳光板的尖锐边接触。所有引出的信号电缆和高压线要求不能轻易受力脱落或断开。
- 4.4 气管连接紧密，不允许漏气，与阻性板室气嘴连接处须涂胶，着重防止溢胶堵气管。
- 4.5 各焊点光滑圆润，大小适宜，不允许虚焊。每道读出均须用万用表检查是否正常。
- 4.6 模块内的尖锐边、角均须用胶条胶布包裹以免割伤电缆。
- 4.7 各层读出条均需跟相邻阻性板室、蜂窝板、阳光板用双面胶粘接固定，不能滑动。
- 4.8 各层阻性板室、阳光板与铝盒边缘的缝隙必须用橡胶条严密固定，保证不能移动。
- 4.9 阻性板室边缘绝缘耐压膜以及上下表面麦拉膜须完整无破损，气嘴高压头连上高压线后用麦拉膜加高压膜完整包裹避免漏电。
- 4.10 所有橡胶块，橡胶条必须固定在铝盒内不能自由移动，橡胶块高度不能高于铝盒框架。
- 4.11 所有匹配电阻外部套热缩管保护。
- 4.12 所有信号电缆，高压线，气管必须贴标签区分。
- 4.13 高压检查时确保每一对正负高压的电流值基本相等。

4.4.2 模块测试方法

合格裸室将用来组装模块，在通过气体检漏后模块被吊装到测试台作进一步的测试。

如图 4.17 所示, 位于最上面的模块和位于最底部的两个模块一同构成了阻性板室模块测试的触发系统, 这是和裸室测试的触发系统是类似的, 只不过闪烁体耦合光电倍增管换成阻性板室模块罢了。并且后者优势在于由于触发系统的尺寸与被测物体的尺寸相当, 因此更能全面反映模块各个部分的效率。每个模块读出连接一个电子学板卡 (Front End Card, FEC)。模块测试的电子学逻辑如下: 电子学板卡甄别后将模拟信号转换为数字信号后, 按照本地触发逻辑给出相应的触发信号。触发信号送入 USB-ROM 处理后, 再被送回电子学板卡确定是否保留并传输该事例的数据。最后数据经过 USB-ROM 传到个人计算机。

4.4.3 模块测试结果

由于模块内部有四层, 第 1 和第 4 层是 X 方向 (X 方向与电子学板卡垂直), 第 2 和第 3 层是 Y 方向 (Y 方向与电子学板卡平行), 每层有 8 根读出条, 因此整个模块平面可划分为 $8 \times 8 = 64$ 块小方块(patch)。计算小块效率时根据触发模式分为 2/4 效率和 3/4 效率。下图为某一模块的 64 个小块 2/4 效率和 3/4 效率。可以看到大部分的小块效率都在 99% 以上。如图 4.18 所示, 中间 16 个小块的 3/4 效率比其他的低大概 5%。原因是这 16 个小块是带有死区的小块。但是这 16 个小块的 2/4 效率基本不受影响[27]。



图 4.17 模块测试现场

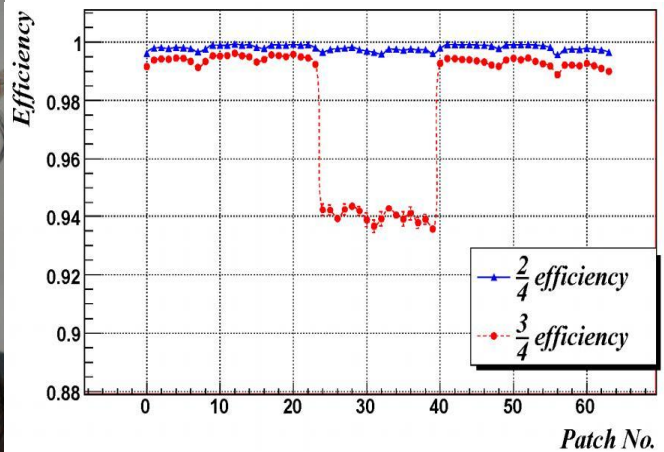


图 4.18 某一模块的小块效率

图 4.19 和图 4.20 是 200 块模块的 2/4 效率和 3/4 效率统计结果。可以得到模块 2/4 的效率是 99.80%, 模块 3/4 的效率是 97.84%。图 4.21 和图 4.22 是 200 块模块的来自小方块 2/4 效率和 3/4 效率统计结果。注意到图 4.22 在 94% 的地方有个小峰, 这就是包含死区的小块效率的贡献结果。值得注意的是, 无论是裸室测试还是模块测试, 测试环境都是位于海平面, 此时 μ 子通量约是 200 Hz。

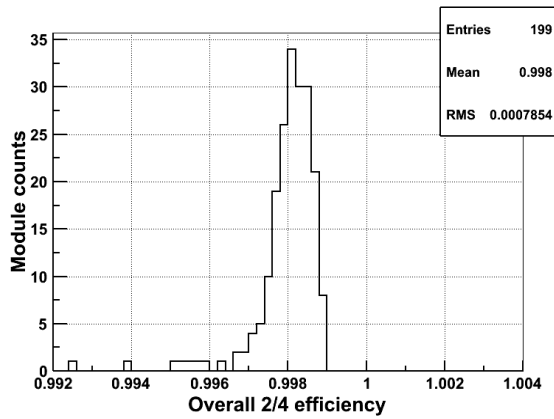


图 4.19 模块 2/4 效率统计分布

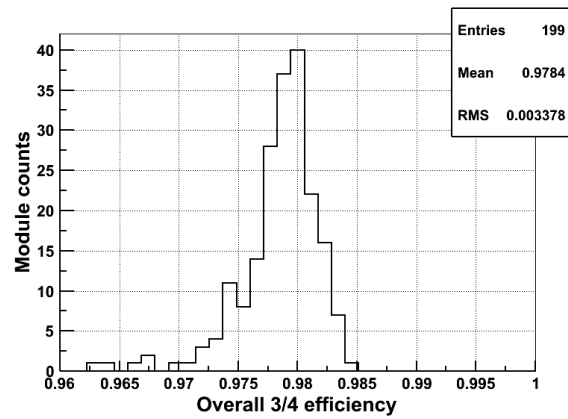


图 4.20 模块 3/4 效率统计分布

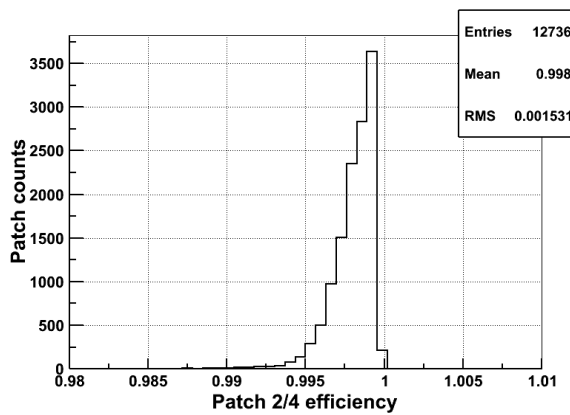


图 4.21 小方块 2/4 效率统计分布

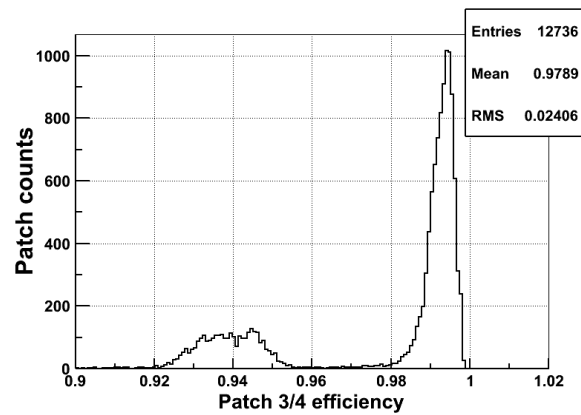


图 4.22 小方块 3/4 效率统计分布

4.4.4 模块振动测试

测试合格的模块需要从北京的高能所运送到两千多公里的深圳的大亚湾实验基地，考虑到不方便吊装、路途遥远等因素，最后放弃铁路运输而选择卡车运输。但是卡车运输过程会有振动、晃动、加速、减速和碰撞等情形出现，它们有可能会对探测器造成损坏。为此在进行长途运输之前，需要做一些短途的振动测试，确保没有问题才能让模块长途运输。

在将 8 个模块装入铁框后，用木板、橡胶垫和海绵等东西塞满空隙，确保在出现晃动时模块不会撞到铁框。为了能够记录运输过程中出现的最大加速度，在一个模块安装了一个加速度传感器，记录整个测试过程的加速度。小卡车载着模块，选择在北京周边较差的路况行驶了两百公里后，再次将模块运回实验室重新测试。测试结果[27]如下：

1. 打开模块检查裸室，未观察其表面出现异常；
2. 模块内部读出条和读出地的电阻，管脚等部位未出现断路；
3. 对模块通气发现各路尾气流量正常，说明裸室没有出现开裂；

4. 重新测试模块的效率，测试结果前后一致；
5. 根据加速度传感器的记录情况，测试过程中出现的最大加速度不超过 $|\pm 2|$ g，这说明目前模块运输的装配方案可行，不会使模块在运输过程中出现大问题。

4.5 数据库软件简介和安装

在阻性板室探测器的组建过程中，每个裸室和模块都需要经过严格测试，保证其拥有较高的探测效率，为此产生了大量的测试数据。为了实现质量控制和方便日后探测器运行维护，需要对这些数据纳入到数据库的框架，便于查阅和统计。

构建数据库服务端所使用的软件包括MySQL、PHP、Apache三部分，如此可花费较小的成本即可搭建一套性能可靠的数据库系统。网络客户端的网页编写采用AJAX技术，这样可以构建一个具有良好交互性的界面，极大方便用户使用。MySQL是一个开放源码和免费的小型关联式数据库管理系统，目前被广泛地应用在Internet上的中小型网站中[66]。PHP更快速的执行动态网页，PHP作为免费使用的脚本语言，其作用是将程序嵌入到HTML文档中去执行，并且支持几乎所有流行的数据库以及操作系统[67]。Apache是免费的Web服务器软件。它的特点主要在于它的源代码开放、支持跨平台的应用（可以运行在几乎所有的Unix、Windows、Linux系统平台上）以及它的可移植性等方面[68]。使用以上软件，可以免费搭建一套满足工程需要的数据库系统。

MySQL 和 Apache 可以分别通过互联网免费下载和安装。但是如果在视窗系统下可以直接在 <http://www.newhua.com/soft/75600.htm> 下载 Apache+PHP+MySQL 服务器套件。下载后进行安装，可以满足基本的工作需要。由于初次安装时 MySQL 的管理员 root 对应的密码为空，出于安全考虑需要设置密码。一种办法是通过命令行设置，另一种是图形界面。但这种方法还需要安装 MySQL Administrator 和 MySQL Query Browser。这两个软件安装完毕后，打开 MySQL Administrator 后，点击 User Administration 即可设置密码。

4.6 数据库设计

数据库可以分成电木板（阻性板相关的数据）、阻性板室（裸室相关的数据）和模块（模块相关的数据）三大部分。

4.6.1 电木板

数据库的电木板部分保存了体电阻率测试和面电阻率测试的数据。由于这两者是在不同的时间进行测试的（首先会测试电木板的体电阻率，之后完成石墨喷涂才测试面电阻率，中间会间隔较长时间），如果二者的数据存放在同一个表内，在先录入体电阻率的数据时，面电阻率的数据是空的，在下次录入体电阻率数据时，SQL 语言的 insert 命令操作之前，会先查询体电阻率数据是否存在，如果存在则会导致该次操作失败。另外由于电木板的体电阻率还会存在多次测量的可能，因此会出现同一个电木板的多个体电阻率对应一个面电阻率的情形。因此应该将二者分为两个表存放，并且将电木板编号和测试日期同时作为主键才能区分每次的测试结果。

体电阻率数据存放在“bakelite_res”这个表里，里面的字段包括电木板编号（bake_id，作为主键）、测试日期（test_date，作为主键）、环境温度（test_tem）、环境湿度（test_hum）、测试高压（hv）和九个测试点的暗电流（cur_1, cur_2, cur_3, cur_4, cur_5, cur_6, cur_7, cur_8, cur_9），以及暗电流、体电阻率、20℃时标准体电阻率的平均值、最大值、最小值（dark_cur_max, dark_cur_min, dark_cur_avg, bake_res_max, bake_res_min, bake_res_avg, res_20_max, res_20_min, res_20_avg）。

面电阻率数据存放在“gra_res_a”这个表里。这个表的字段包括电木板编号（bake_id，作为主键）和两个测试点的石墨面电阻率（gra_res_a, gra_res_b）。

4.6.2 阻性板室

数据库的阻性板室部分包括裸室组成、老练、裸室测试和裸室型号这四个部分。

裸室组成由名为“rpc_mat”的表描述，里面的主要字段包括裸室编号（rpc_id，作为主键）和两块阻性板的编号（bake_id_a 和 bake_id_b）。因此利用裸室编号查询出组成裸室的两块电木板的体电阻率和面电阻率信息。

裸室测试的数据是由两个表“rpc_run”和“rpc_per”描述的。每次裸室测试得到的数据文件包含同时测试的几块阻性板室探测器的数据。表‘rpc_run’包含的字段有数据文件名（data_file，作为主键）、测试时温湿度的起始值、结束值、最高值和最低值（tem_begin, tem_end, tem_max, tem_min, hum_begin, hum_end, hum_max, hum_min, pres_begin, pres_end）、气体比分（gas）、起止时间（date, time_begin, time_end）、温度最高和最低对应的时间点（time_max, time_min）和最佳的工作高压（oper_volt）。表‘rpc_per’保存了测试数

据文件的内容，含有的字段有裸室编号（rpc_id，作为主键）和数据文件名（data_file，作为主键）、组装的状态（assemble）、扫描的次数（loop_num）、6kV 到 9kV 的 3 重符合计数（3coin_6000 - 3coin_9000）、4 重符合计数（4coin_6000 - 4coin_9000）、效率（eff_6000 - eff_9000）、单计数率（scr_6000 - scr_9000）、暗电流（cur_6000）、最佳的工作高压及对应的效率、单计数率和暗电流（oper_volt, oper_eff, oper_scr, oper_cur）、测试有效性（validity）和电木板状态（bad_bake）。

描述裸室状态的两个表是“rpc_ass”和“rpc_style”。裸室编号（rpc_id）是这两个表的主键。表‘rpc_ass’除了主键外还有一个记录裸室是否已经安装成模块的字段。表‘rpc_style’除了主键外还有一个记录裸室型号的字段（A 型或 B 型）。

4.6.3 模块

数据库的模块部分包括模块的组装和测试结果这两个部分。组装的数据存放在“mod_ass”表。表的字段有模块编号（mod_id，作为主键）、组装日期（date）、温度（tem），湿度（hum）以及模块内部的八个裸室编号（rpc_id_1, rpc_id_2, rpc_id_3, rpc_id_4, rpc_id_5, rpc_id_6, rpc_id_7, rpc_id_8）。模块测试结果存放在三个表里，它们分别是“module_per”、“module_patch_2of4trigger_eff”和“module_patch_3of4trigger_eff”这三个表里。第一个表包括模块编号（mod_id，作为主键）、测试温度、湿度、压力的最大值和最小值（high_temperature, low_temperature, high_humidity, low_humidity, high_pressure, low_pressure）、测试高压(test_HV)、工作阈值（threshold）、流量（flowrate）、测试起始和结束时间（begin_time, end_time）、测试结果为第几次（test_times）、2/4 和 3/4 的触发率和效率（2of4_trigger_rate, 3of4_trigger_rate, 2of4_eff, 3of4_eff）。后两个表则保存了将模块划分为 64 个小方块时计算得到小方块的 2/4 和 3/4 效率。

4.7 数据库功能

如图 4.23 所示，数据库分为查询模块、统计模块和数据录入、更新和删除模块。查询模块用来查询模块、裸室和阻性板三个部分，而统计模块主要输出关于模块、裸室和阻性板的数据统计信息；数据输入模块则用于实现模块测试数据、裸室测试与老化数据、阻性板质量跟踪卡等数据的输入、更新和删除，但这只能以管理员身份进行操作。

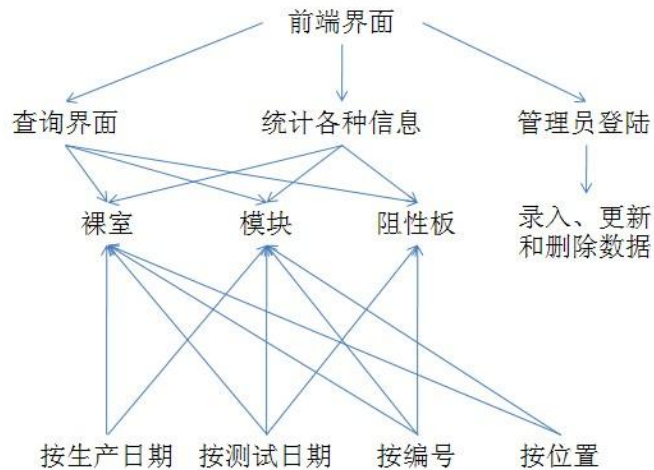


图 4.23 程序结构示意图

4.7.1 查询功能

本数据库系统提供了 3 种方式的查询，包括根据模块、裸室和阻性板的编号、生产日期、测试日期和位置来查询。并通过该图表结合的方式将查询结果直观的显示出来。如图 4.24 所示，根据给定的时间范围，查询从 2010 年 10 月 01 日至 2010 年 12 月 01 日期间测试过的裸室编号。

Test date from 10-10-01 to 10-12-01:					
There are 10 small RPCs:					
080326086S	080417145S	080904453S	091106863S	091110873S	091111884S
091111887S	091111888S	091112906S	100402909S		
There are 27 big RPCs:					
081007487B	081022534B	090915853B	091020860B	091020863B	091020864B
091021872B	091102877B	091102882B	091102885B	091102886B	091103892B
091103896B	091103897B	091103901B	091105905B	091117914B	091117915B
091117916B	091117920B	100401923B	100401936B	100401941B	100401950B
100401951B	100401952B	100401956B			

图 4.24 根据测试日期查询 RPC 编号

4.7.2 统计功能

根据实验的需要，不仅需要了解单个模块、裸室和阻性板的有关信息，还需要从统计的角度了解总体状况，例如需要了解已测试大型裸室的合格率。因此针对这种需求专门开发了统计功能的模块。如图 4.25 所示，利用数据库查询目前已进行测试的裸室效率、单计数率和暗电流的统计分布[26]。

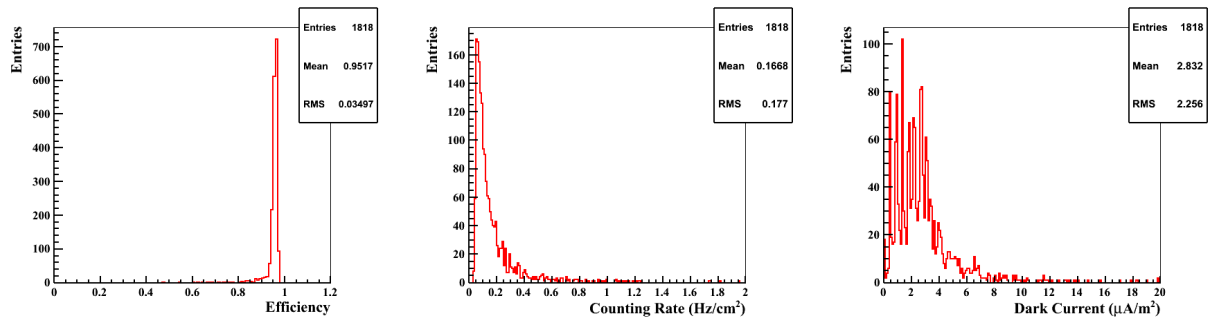


图 4.25 裸室效率、单计数率和暗电流的统计分布

4.7.3 显示功能

除了将查询结果和统计结果用图的方式反映出来外，还采用 AJAX 技术，支持用户使用鼠标在图片上拖曳来放大细看图片的某个区间。具体实现过程是当用户进行鼠标拖曳操作的时候，浏览器会在后台异步发送数据去连接服务器端的数据库，重新生成新的图片，并在不刷新浏览器的情况下重新载入图片。如此极大方便用户使用。如图 4.26 所示，左图是未放大的原始图，右图是在左图基础上进行鼠标拖曳后局部放大的图，实现类似用 ROOT 软件查看图片时对图片进行局部放大的功能。

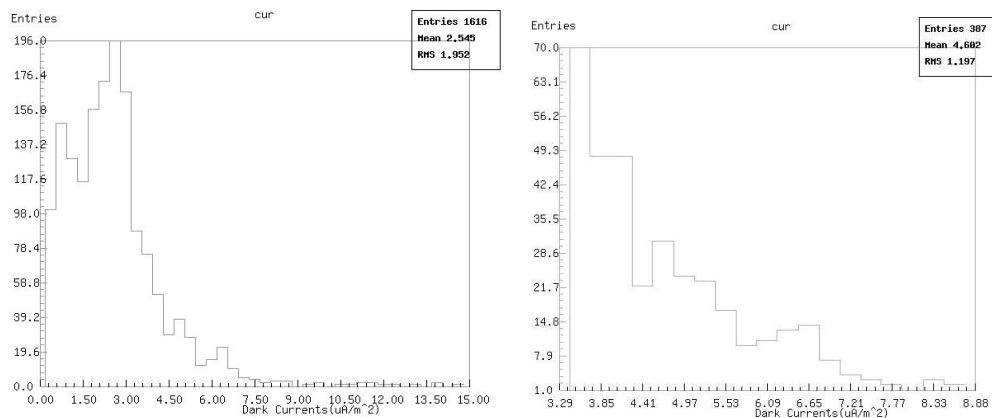


图 4.26 基于 AJAX 技术的图形显示

4.7.4 数据输入功能

需要输入的数据来着裸室、模块的测试文件、裸室的老化记录文件、模块组装信息表等，因此装载数据的介质包括纸质和电子文档，因此针对不同的文件开发了一些数据录入模块。如针对纸质的数据，提供前台数据输入接口，以供使用键盘手动输入；对于电子文档，则要求按照统一的数据格式生成数据文件，以使用相同的数据接口将数据快速录入到

数据库。

4.8 本章小结

本章介绍了大亚湾阻性板室探测器的裸室和模块的宇宙线测试。首先介绍了裸室测试需要完成的准备工作，接着对宇宙线测试系统以及测试流程作了一些基本的介绍，然后分析宇宙线测试的数据结果。所有生产裸室效率的平均值为 92.7%，单计数率和暗电流的平均值分别为 0.159 Hz/cm^2 和 $2.717 \mu\text{A/m}^2$ 。最后简单介绍了一下阻性板室模块的测试结果，模块的 2/4 和 3/4 效率的平均值分别在 99.8%和 97.4%。为了模块安全运输做的振动测试结果表明，在最大加速度不超过 $\pm 2 \text{ g}$ 的情况下，采用的模块运输方案安全可靠。由于大亚湾阻性板室探测器对阻性板、裸室和模块的性能测试生成大量的数据文件，采用 MySQL+PHP+Apache，可以花费较低的成本满足实验的要求，并且将极大地方便数据管理和提高工作效率，并在阻性板室探测器正式运行后的维护工作中发挥积极地作用。

第五章 阻性板室探测器的安装、调试和试运行

阻性板室探测器安装是在矮厅（又叫阻性板室厅，图 5.1 中阻性板室探测器停放位置即是矮厅）完成的，因此可以和其它探测器安装和试运行工作同步进行，其中一号厅的安装时间是 2011 年 3 月份至 4 月份，二号厅的安装时间是 2011 年 8 月份至 9 月份，三号厅的安装时间是 2011 年 12 月份。本章主要介绍阻性板室探测器以及各个辅助系统包括高压系统、气体系统、探测器控制系统（Detector Control System, DCS）、电子学和数据获取系统的安装、调试和试运行。

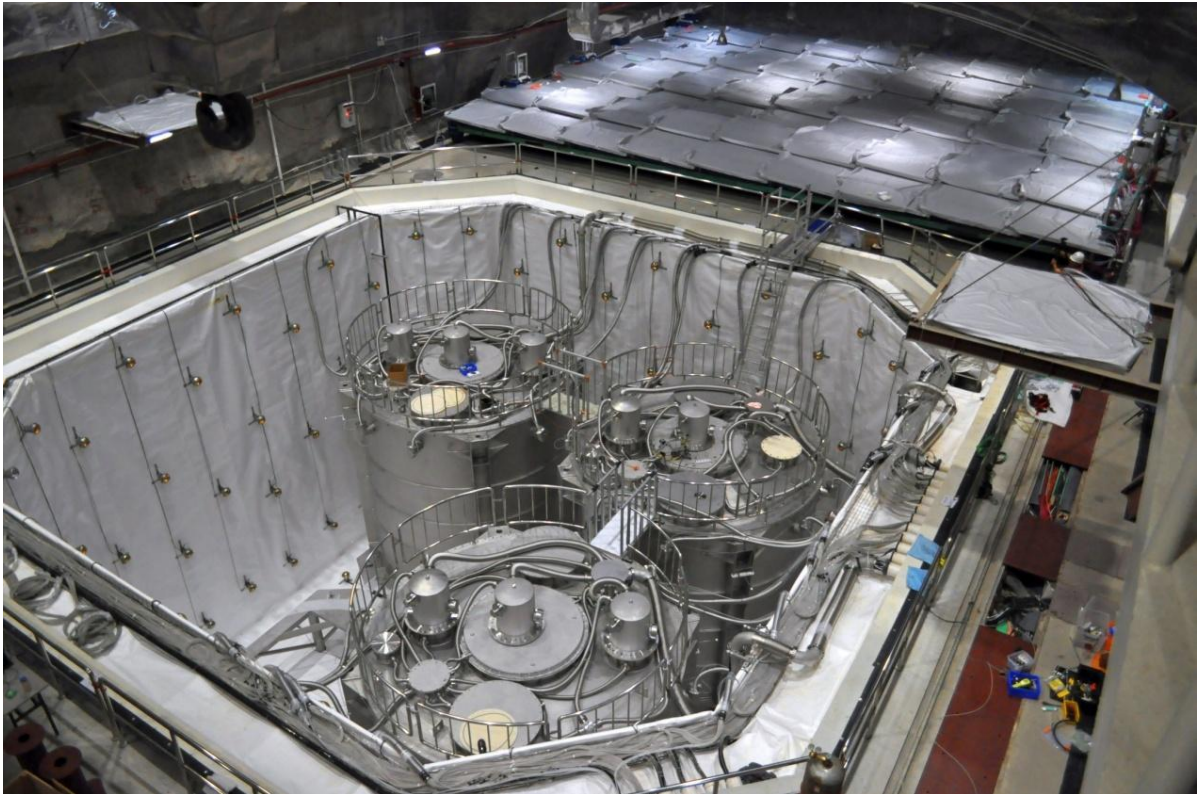


图 5.1 阻性板室安装现场

5.1 阻性板室探测器安装

5.1.1 模块安装前准备

模块在经过两千多公里的运输后从北京运送到深圳大亚湾实验基地后，并不能立刻安

装。尽管在运输前做了各种测试确保运输方案的可靠性，可在运输过程中仍不可避免会出现剧烈的振荡、撞击和杂质颗粒物有可能进入模块内部的现象，造成阻性板室探测器的破损、内部气管漏气或者堵塞、高压插针脱落、高压线头短路、匹配电阻断路和地线断接等各种问题，因此需要经过气密性、高压和电子学测试后才能安装，否则安装后发现问题再修理是一件很困难的事情。需要开展的检查工作如下：

1. 模块的气密性检查。采用 U 型管对模块加 50 mm 的水柱压力，要求在 30 分钟内水柱下降不能大于 5 mm。
2. 高压测试。要求在通纯氙气下，每一个裸室能够加载 8000 V 的高压，且漏电流不出现过流。如果出现过流或者漏电流为 0，则记录该模块有问题的通道，以便后期修理。
3. 安装电子学板卡，进行地线检查，对电子学初步测试，确保安装好的板卡可正常工作。

如果没有通过以上测试的模块，将会在地表装配大厅进行维修。

图 5.2 显示的是某批次模块在室温为 26 - 27 °C 时的高压测试结果，得到了 1024 块裸室的暗电流和体电阻率（根据公式(3.2)已换成 20°C 时的标准体电阻率）的分布情况。可以看到暗电流总体分布在 100 - 400 μA 之间，体电阻率集中在 0.6 - $5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。章节 3.3.1 提到体电阻率的正常范围是 0.6 - $2.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ ，因此这一批裸室的体电阻率稍微偏大。

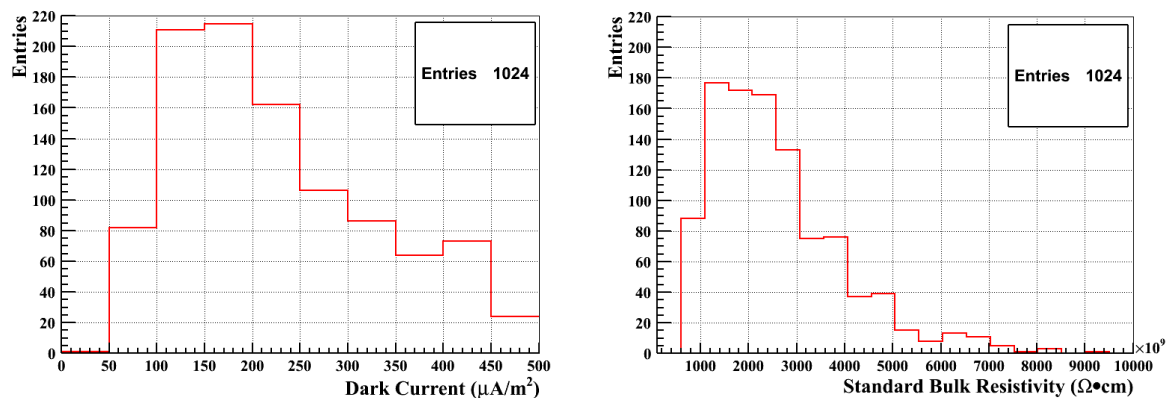


图 5.2 暗电流和体电阻率测试结果

5.1.2 模块安装

模块安装包括模块安放固定、气管、高压电缆、电子学电缆和地线连接以及阻燃防水布的覆盖。图 5.3 显示模块吊装时的情景。可以看到，在吊装时需要将整个支撑架移动到

水池边缘，这样吊钩才能将需要安装的模块放到需要的位置。模块的外壳和支撑架都是连接到脏地的，但是模块内部的读出地层是连接到干净地的。



图 5.3 模块吊装

在移动整个支撑架前后需要注意几个问题 [69]:

1. 移动前需要关闭高压和电子学系统;
2. 无论是支撑架停靠在矮厅或者水池上方，移动前都需要移走水池管道（即图 5.4 中黄颜色管道），否则移动过程中支撑架的车轮将会碾压到管道;
3. 移动前需要将干燥气体的进气管道断开（即图 5.5 中竖直的管道）;
4. 断开望远镜模块的高压电缆（图 5.6）和地线（图 5.7），另外在移动过程中需要密切注意望远镜模块的气管，避免被轮子碾压;
6. 移动过程需要密切注意坦克链（图 5.8）情况，避免卡壳和压坏高压电缆;
7. 在移动前需要将阻性板室探测器的尾气管道断开。由于尾气含有对人体有害的难闻气体 SF_6 ，所以即使支撑架暂时停放在矮厅，最好连接好尾气管道（图 5.8 为透明的管子）;
8. 如图 5.9 所示，支撑架在正常取数时，正确的停放位置是支撑架的蓝色箭头需对准地面的红线;

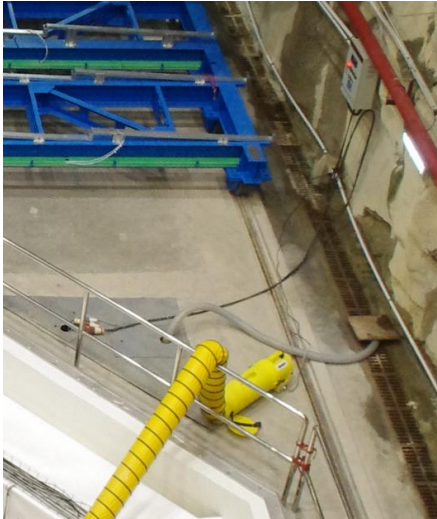


图 5.4 水池的管道



图 5.5 干燥气管



图 5.6 望远镜模块的高压电缆



图 5.7 望远镜模块的地线



图 5.8 探测器尾气排放管



图 5.9 支撑架停车位置

5.1.3 模块的摆放和坐标

离线软件定义的阻性板室探测器的坐标如图 5.10 所示，坐标的原点是离电子学间最近的一行中最左边的模块。水平面远离电子学间的方向为行方向，平行电子学方向为列方向。一号厅和二号厅阵列大小是 6 行 $\times$ 9 列，三号厅的阵列大小是 9 行 $\times$ 9 列。这三个厅均有两个望远镜模块。如图 5.11 所示，这两个望远镜模块位于水池边上，放在阵列的中间位置（位于第 5 列），距离阵列模块约 2 m 的垂直高度。

图 5.11 显示，一号厅模块和支撑架之间存在约 3 度的夹角。这么摆放的好处是既可以实现模块间具有约 10 cm 重叠区域来减少探测死区又可以使得每个模块可以独立安装和拆

卸。此时电子学间位于右边。二号厅的模块和一号厅类似，但是三号厅的模块摆放和一号厅相反，具体说来就是如果在三号厅还是从侧面观察支撑架，电子学间还是位于右边，那么模块和支撑架的夹角是 $(180 - 3) = 177$ 度。

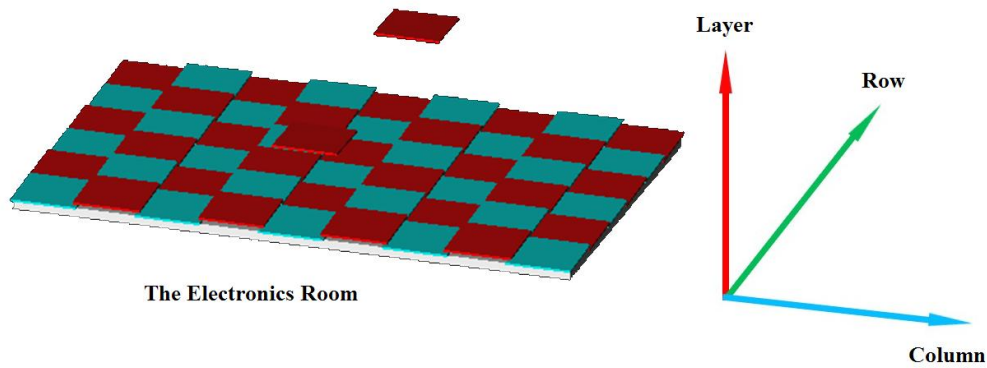


图 5.10 阻性板室模块阵列示意图



图 5.11 一号厅的支持架侧面实物图

每个模块的大小是 $2.17 \text{ m} \times 2.20 \text{ m} \times 0.08 \text{ m}$ ，内部结构如图 3.17 左边部分所示。模块分为 4 层，正如图 3.17 右上部分所示，每层包含一个小的裸室 ($1.00 \text{ m} \times 2.10 \text{ m}$) 和一个大的裸室 ($1.10 \text{ m} \times 2.10 \text{ m}$)，相邻层之间的两块裸室布局相反，如此可以减少同层两块裸室之间的死区 ($0.024 \text{ m} \times 2.10 \text{ m}$)。大亚湾实验总共用了面积为 $2.1 \text{ m} \times 2.1 \text{ m} \times 4 \times 195 = 3440 \text{ m}^2$ 的裸室。

如前面章节的图 3.17 右下方部分所示，阻性板室信号是由 $2.1 \text{ m} \times 0.26 \text{ m}$ 的读出条拾取的，读出条两端通过各接两个 27Ω 的接地电阻来实现阻抗匹配，但其中某一端还连接到电子学板卡上作为信号读出。由于制作的读出条铜板大小限制，因此每层需要覆盖两块读出条玻璃纤维 (FR4) 覆铜板，每块铜板包含 4 根读出条。因此一个模块包含了 32 根读

出条（4 根/板 × 2 板/层 × 4 层）。如图 3.17 所示，离线软件将最底层定义为第 1 层，最上层为第 4 层。其中第 1 层和第 4 层是 X 方向（此时读出条的方向与 X 方向垂直），第 2 层和第 3 层是 Y 方向（此时读出条的方向与 Y 方向垂直）。

5.2 探测器辅助系统

阻性板室探测器作为气体探测器，因此如图 5.12 所示，其辅助系统包括高压系统、气体系统、探测器控制系统和电子学系统。探测器控制系统用于高压系统和气体系统的监控，因此将其穿插在高压和气体系统的介绍中。

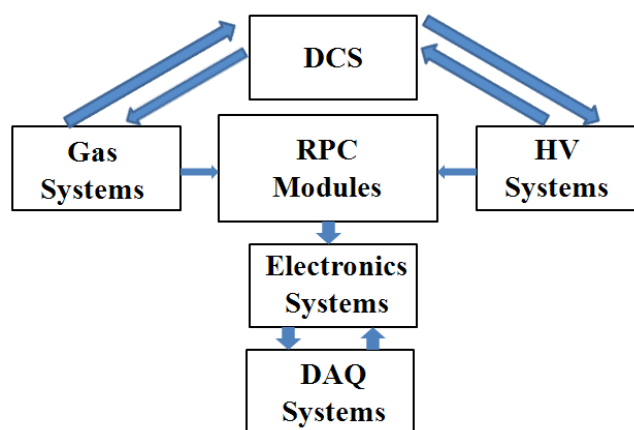


图 5.12 阻性板室探测器的辅助系统

5.2.1 高压系统

由于每块裸室分别需要加载 $\pm 3700\text{ V}$ 的高压才能稳定工作，因此一号厅的高压机箱里安插正负各两块的高压插件，每一路高压插件的通道引出的高压电缆，首先连接到一块高压扇出板，将 1 路高压分为 9 路。这 9 路分别连接到 9 个模块的同一层上，在模块高压盒（RPCI）端又将每路一分为二，为每层的两个裸室的提供高压。整个高压系统的地线连接在电子学间的干净地上，因此位于远端的高压扇出盒和高压盒的地是悬空的。。在试运行过程中高压频繁出现问题，主要包括几个方面：

1. 高压频繁打火，具体表现为无法加载高压、加载高压一段时间后过流、暗电流随时间变化图显示有毛刺等几个现象。这几个本质上讲都是高压过流造成的，主要原因是高压器件质量不过关。具体讲有几个来源，一是高压扇出板内部是采用铜棒分配高压，但是铜棒没有涂覆绝缘漆，使得铜棒会对高压扇出盒打火，并且高压扇出盒是采用金属螺钉（后

来才更换塑料螺钉) 固定在架子上, 难以保证绝缘性; 二是如图 5.13 所示, 高压盒内部的蓝色接头在制作时有瑕疵, 导致有裸露在外的金属线引发打火; 三是探测器由于之前在隧道存放过受到潮气损害以及洞顶下落的水滴进入探测器以致打火。对前两种问题采取补救的措施, 例如铜条涂覆绝缘漆, 蓝色接头重新制作等办法, 对于最后一种情况, 采取更换有问题的模块, 和如图 5.15 所示, 给每一个模块覆盖一块阻燃的防水布, 使得水滴落到布上后无法渗透到模块内部, 只能沿防水布表面滑落(前面提到模块是倾斜放置)到支撑架下面。

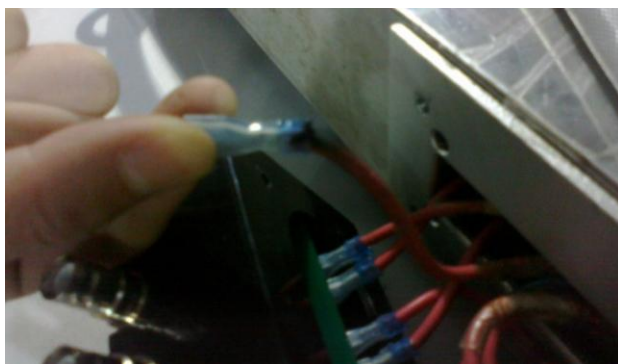


图 5.13 蓝色金属头打火后烧焦情形



图 5.14 阻性板表面绝缘膜破损



图 5.15 覆盖在模块上的阻燃防水布

2. 探测器暗电流过大, 以致电流的晃动稍大一些就过流。在和高能所的测试结果比较后, 怀疑是安装期间正值深圳夏季, 地下大厅的湿度极高, 甚至超过 90%, 这使得探测器的暗电流急剧增大。即使除湿机全功率运行, 由于大厅的体积过大, 并且在安装和试运行期间, 大厅的门口并不封闭, 使得湿度难以有效控制在探测器正常工作的范围($< 60\%$)。因此只能从降低模块内部的湿度入手, 如图 5.16 所示, 通过往模块内部不断鼓吹干燥空气(干燥管出口的干燥气湿度是 10%), 能将局部湿度控制在 60%以下, 如此确保了探测

器正常工作。图 5.17 a)部分是干燥空气流进的管线，可以看到干燥空气最终直接从模块排放到大厅里，b)部分是在同干燥气前和连续 10 天通干燥气后的暗电流（期间未加高压）比较，可以看到通干燥气后暗电流降为原来的一半。



图 5.16 干燥气管插入模块内部

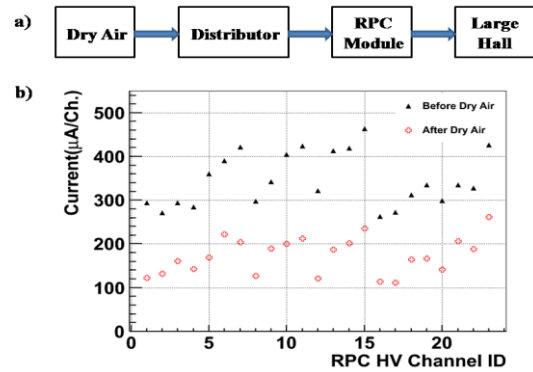


图 5.17 干燥气流经的管线和通干燥气前后效果比较

5.2.2 气体系统

如图 5.18 所示，每个厅的气体系统包括气瓶、气体混合及监控装置、气体分配系统和气相色谱仪这四个部分。前面已提到工作气体的成分和模块测试时使用的相同，但和裸室测试时的不一样。气体流量是每天一个体积。四种工作气体从气瓶流到气体混气面板进行混合后，分为两路，一路经过气体分配系统后进入探测器后变成尾气，尾气经过数字气泡计数器后，从专门的管道排到地表的空气里，另一路以极少的流量进入到气相色谱仪作为气体比分监测。

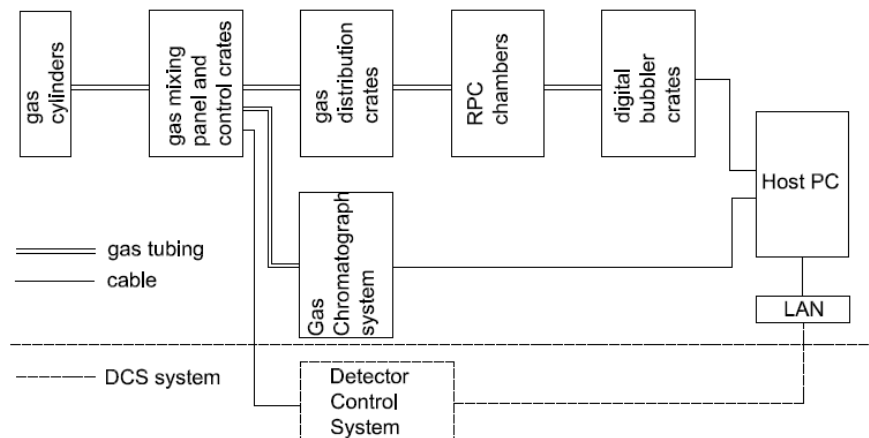


图 5.18 气体系统结构图

数字气泡计数器的功能是统计单位时间内经过较大气阻（通过令气体流经具有大气阻

的毛细管实现，目的是为了使得各路的气阻大致相同）的尾气产生的气泡数目，然后据此换算尾气流量。如图 5.19 所示，利用尾气流量可以分析出模块漏气状况。值得注意的是，有时高压系统出现放电，使得连接在脏地的数字气泡计数器与控制主机的 USB 通讯中断，需要重启主机才能解决问题。类似的情况还有因高压打火影响电子学系统正常工作。

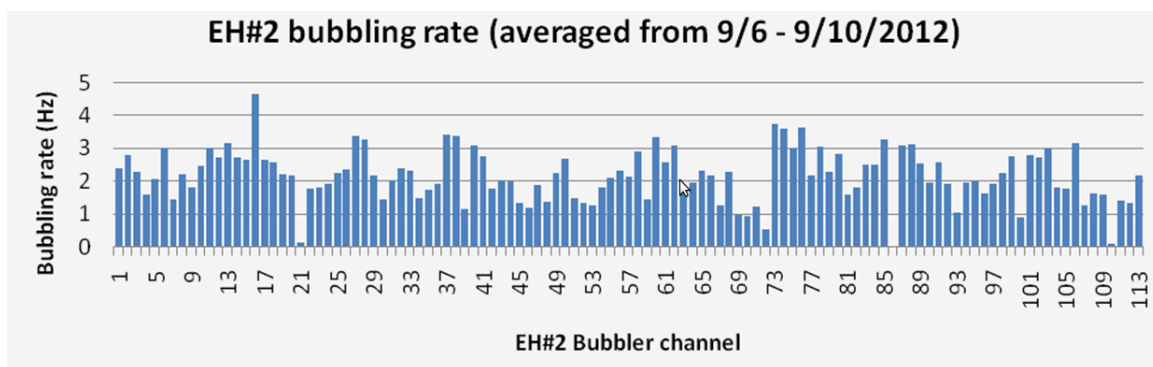


图 5.19 二号厅各个模块的气泡率

在这个过程中探测器控制系统负责远程监控各种气体的气瓶重量、各个通道的气体流量、压力，如果某一路出现问题，为确保探测器的安全，气体系统将自动关闭。直到有关人员手动重启，气体系统才会重新上电。气体系统和高压系统存在安全连锁，如果在 30 分钟内高压系统接收不到来自气体系统的安全信号，将会自动降高压。

5.2.3 电子学和数据获取系统

根据阻性板室探测器电子学的设计需求，阻性板室探测器电子学的系统功能包括两个方面：一个是要能够根据阻性板室模块输出的 32 路模拟信号产生 3/4 本地触发信号，并根据本地触发信号产生读出触发信号；另外一个读出触发信号触发阻性板室探测器信息读出后，要将形成的事例数据组织上传给数据获取系统。因此如图 5.20 所示，阻性板室探测器的电子学系统可划分为读出和触发两个子系统。整个系统由读出模块（ROM）、触发模块（RTM）两个 VME 插件，以及读出收发器（ROT）机箱和前端板电子学板卡构成。VME 插件通过 VME 总线与 VME 总线控制器实现数据交换。每个电子学板卡连接一个阻性板室模块，接收模块 32 个感应条的输出信号。每个读出收发器机箱最多连接 15 个电子学板卡，而每个读出模块或触发模块最多可以连接 6 个读出收发器机箱。一套电子学系统最多可以连接 90 个模块，因此大亚湾实验每个实验厅只需要配置一个读出模块和触发模块[70,71]。

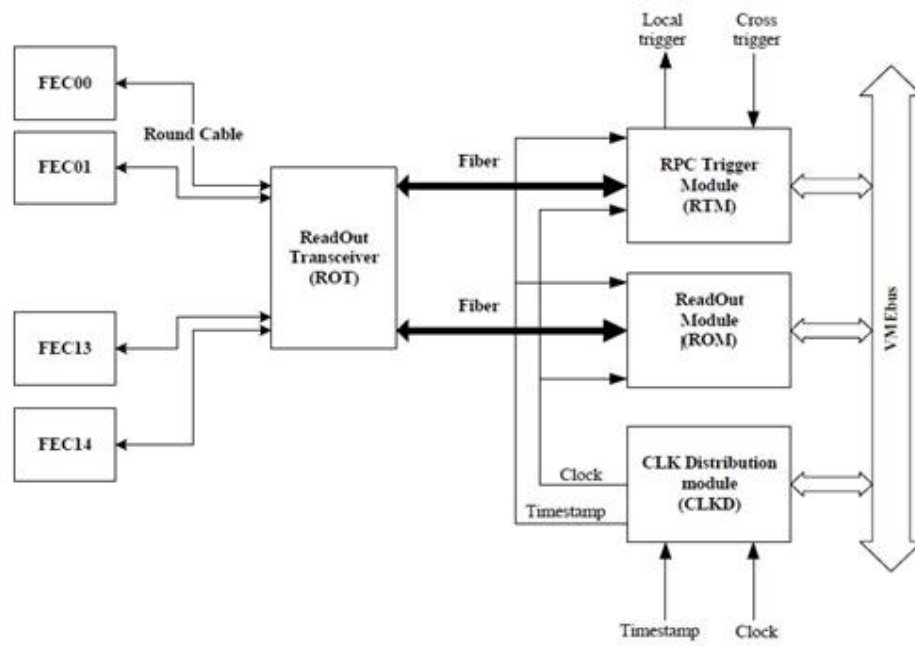


图 5.20 阻性板室电子学的系统结构

5.2.3.1 前端板电子学卡

从图 5.21可以看到有4 个功能模块，分别是信号甄别(discriminators)、甄别阈设置(threshold setting)、FPGA和LVDS转换收发，它们构成了前端板电子学卡。其中LVDS转发模块通过读出收发器连接读出模块和触发模块。前面提及的4个模块的主要功能和相关的设计原理如下：

1) 信号甄别模块（signal discriminator）

信号甄别模块的主要作用就是将每个模块产生的32路模拟信号和预先设定的比较器阈值进行比较，若是信号幅度大于阈值，则过阈触发并转换为数字信号后送入FPGA。值得注意的是，既可以为每个模块的32路信号设置一个共同的阈值，也可以单独为每一路信号设置阈值。

2) 甄别阈设置电路（threshold setting）

甄别阈设置电路的主要功能是接收来自FPGA的设置数据，并根据设置数据将甄别阈设定为对应的电平信号。此电平信号作为甄别器的甄别阈电平。值得注意的是，由于之前的测试存在问题，之前设置-40 mV的对应DAC码1432，后来重新测试时发现并确认为-35 mV。有时候数据获取系统在配置电子学时出现FEC config error报错（具体表现为此时一定不能给电子学板卡下发命令，但是该电子学板卡往外发送的数据有时候却能被读取到，这

是由于连接光纤的buffer出现异常问题，导致命令下发后读出收发器无法识别)，所以将每个甄别器的默认阈值固定为常用阈值，这样即使配置不成功仍然有可能读取到数据。

3) 现场可编程阵列 (FPGA)

FPGA主要负责逻辑功能的实现，除了完成接收来自读出模块的命令，对甄别阈进行设置等配置功能外，FPGA主要完成两个方面的系统功能：

3.1) 与触发相关的系统功能。根据从甄别器输入的32路数字信号产生本地触发信号，将本地触发信号上传给触发模块，并接收从触发模块下发的读出信号。这个与触发模块相关的过程的时间称之为触发延迟 (trigger latency)，其大小关系到数据的完整传输，因此需要通过测试来决定。后面会专门讨论延迟触发的选取。

3.2) 与数据读出相关的系统功能。FPGA 缓冲从甄别器输入的数字信号，在接收到读出信号的时候，从流水线缓冲器出口处的数据窗口选取数据并添加秒内时标信息，将组合后的数据存入事例缓冲器。事例缓冲器中的数据由 FPGA 中的串行数据发送模块通过读出收发器发送给读出模块。

4) LVDS收发模块

LVDS收发模块负责电子学板卡与读出传输板读出收发器之间的互连。串行时钟、串行数据、命令、本地触发信号、读出触发信号、报错等信号都通过此模块进行传送。

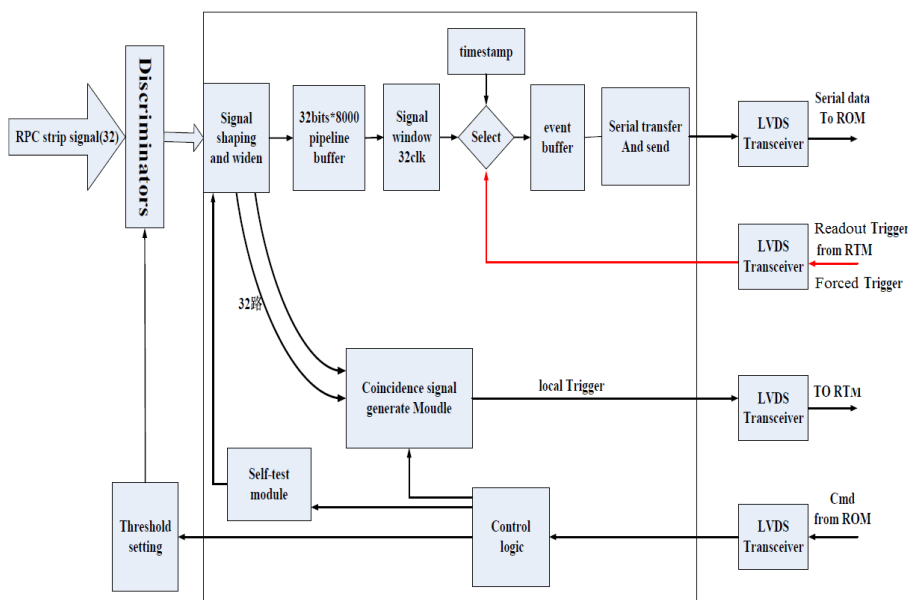


图 5.21 电子学板卡的基本结构

5.2.3.2 读出收发器

读出收发器作为电子学板卡和读出模块、触发模块之间的通信桥梁，电子学板卡上传的信息将由读出收发器转发给读出模块和触发模块，而读出模块和触发模块下发的命令也由读出收发器转发给各个电子学板卡。由于电子学板卡是通过电缆连接到读出收发器的，因此长时间运行后由于电缆自重，使得电缆和读出收发器的接触存在轻微松动，这也就造成前面提到无法下发命令却能收到上传结果。因此在读出收发器上安装支撑架子，使得电缆接头处受力减小来避免松动。值得注意的是，读出收发器与两个 VME 之间是通过光纤进行传输，由于光纤本身和接头很轻，因此避免了类似问题。

5.2.3.3 读出模块和触发模块

前面提到读出收发器到触发模块之间的传输使用的是抗干扰能力强的光纤。但是由于电子学板卡和读出收发器是使用抗干扰能力弱的电缆，为了避免数据丢失，因此电子学板卡和触发模块之间的数据传输采用 3-8 传输机制以增强本地触发信号的抗干扰能力。所谓 3-8 机制就是在信号的发送端将单个周期的本地触发信号展宽为 8 个时钟周期的宽度发送，而在接收端，当看到有效的上升沿后，接收端只有在接下来的 8 个时钟周期时间内收到连续的 3 个时钟周期的有效信号才认为收到了一个真的本地触发信号，并且能够保证本地触发信号在传输过程中的晃动不大于 1 个时钟周期。触发模块在接收电子学板卡上传的本地触发信号后，会根据本地触发信号产生读出触发信号，该信号仍然采用 3-8 传输机制经光纤发送到相应的电子学板卡。此外触发模块还会产生上传给数据获取系统的触发数据，以便于离线分析时进行数据的检查和事例的重建（本文此处用词沿用最初的电子学设计，当前电子学设计里已将本文提到上传的本地触发信号改为符合信号，下发的读出触发信号改为本地触发信号）。

在读出触发信号送回对应的电子学板卡后，在电子学板卡的 FPGA 中的取数窗口内选取事例数据。如图 5.21 所示，取数窗口（signal window）是电子学板卡的 FPGA 中流水线缓存器（pipeline buffer）出口处的一个数据窗口（它是一个先进先出的缓存器），从流水线缓存器出来的有效的数字化后的感应条输出信号只要还在该窗口内就是有效的，就可以被从触发模块下发的读出信号选中。取数窗口越小，在窗口内可能符合的噪声就越少，探测器的效率就能得到保证。但是取数窗口的宽度受到以下因素制约：影响取数窗口宽度的因素包括以下几点：

- 1) 探测器输出的感应条信号数字化后在FPGA中被展宽了3-4个时钟周期(75-100ns);
- 2) 本地触发信号和读出触发信号在传输时都采用了3-8机制,会引入一定的时间晃动。

因此考虑到还需要保留一些设计余量,因此取数窗口至少8个时钟周期。根据实验测试,目前大亚湾实验中取数窗口在实验证实的情况下被设置为400 ns (16 clock cycles $\times$ 25 ns/clock cycles)。为了能够保证读出冗余,使得读出触发信号回到电子学板卡的时间正好位于取数窗口的中间位置,因此需要通过测试得到合适的触发延迟时间。关于触发延迟的测试结果参见章节5.3.1。

可以看到电子学的系统结构较为复杂(属于电子学板卡-触发模块-读出模块三级结构),之所以这样是因为触发模块的功能是为原先的2/4触发将读取触发模块周边的模块数据这一功能设计的,但是由于现场工作环境是一个低计数率环境,2/4触发包含大量噪声触发,最终放弃使用2/4触发(但电子学的固件中包含这一项功能,通过修改数据获取系统的配置文件,这一功能会重新开放),并且由于入射角度大的 μ 子出现的几率小,有触发时读取到周边的模块大多数是没有击中的,为了减少数据冗余和传输带宽,最终取消了2/4触发和读取周边模块数据的功能。

需要补充的是,在试运行刚开始阶段,由于电子学尚不具备随机触发的功能,为了能够测试噪声,采用的是2/4触发读周边模块的办法来测试噪声率。这是因为对于周边模块而言,由于产生2/4触发的模块是随机的,因此其周围的模块也是随机选择的。但是后来随着电子学随机触发功能的调试成功,可以利用周期性触发的功能测试探测器噪声,因此不再使用原来的办法。当前随机触发的频率是10 Hz,该值的设置可以通过直接修改数据获取系统的配置文件实现。

5.3 阻性板室探测器试运行

5.3.1 触发延迟扫描

从电子学板卡上传本地触发信号,到触发模块返回的读出信号被电子学板卡接收,这段时间称之为触发延迟。准确的说,要求触发延迟时间的时间点对应的是感应条输出信号正好位于取数窗口的中间位置。如果由于触发延迟设置不准确,而此时感应条输出信号正好位于取数窗口(但不一定在正中间位置),此时上传给读出模块的数据是整个取数窗口的数据,因此不会丢失数据,只是系统丢失数据的冗余度减少了而已。相反此时感应条输

出信号部分位于取数窗口或者全部不在取数窗口，这时就会丢失数据，相应的可以看到探测器的 3/4 触发率降低。因此触发延迟扫描结果应该包含一段坪曲线，并且这个坪曲线的宽度等于取数窗口的大小。图 5.22 是一号厅的触发延迟扫描结果。可以清楚的看到当触发延迟超过[45,60]的范围时，数据出现丢失和触发率会下降，这个范围的宽度正好是 $(60 - 45 + 1) = 16$ clock cycles，等于取数窗口的大小。因此当触发延迟的设定值等于 54 时，正好位于这个范围中间。

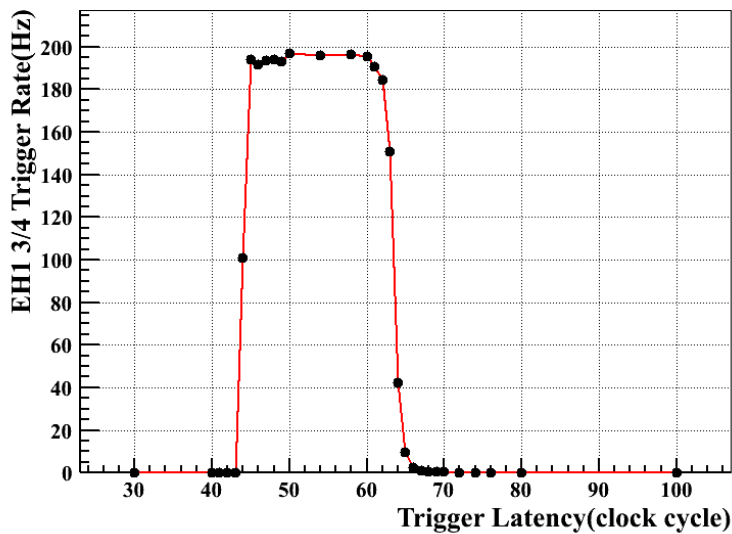


图 5.22 一号厅的触发延迟扫描结果

5.3.2 阈值扫描

2012 年 9 月对三个厅做了阈值扫描（此时探测器停放在矮厅），发现效率随着阈值的升高逐渐降低，但是当阈值超过 $|-80|$ mV 之后效率会进入一个坪区，一直保持平稳。而噪声率却随着阈值的升高逐渐降低。噪声率的变化符合预期，这也排除了在扫描测试时由于未修改获取系统的配置文件而产生效率坪区的可能（如果扫描中出现位于效率坪区的测试点是因为未能成功修改阈值配置造成的，那么噪声率的结果也应该会有坪区）。图 5.24 显示了触发率随阈值升高逐渐降低且并未出现坪区的结果，也证实了以上猜测。因此形成效率坪区的原因只能来自探测器自身的特性（程序代码使用的 SVN 代码，并且效率的结果和 PQM 一致），很有可能是因为探测器出现幅度较大的串扰信号，这些串扰信号幅度超过了 $|-120|$ mV 的阈值，并且使各层同时着火。由于坪区的效率约为 50%，因为这种信号引发的 3 重符合和 4 重符合比例各占 50%。在噪声和 μ 子通量不变的情况下，探测效率越高，

触发率越高，反之触发率越低，探测效率越低。基于这个原理可以利用触发率修正效率，具体参见以下公式：

$$eff = \frac{Tr(thr)}{Tr_{thr=-40\text{ mV}}} \times eff_{thr=-40\text{ mV}} \quad (5.1)$$

其中 eff 是在阈值 thr 下的平均层效率， $eff_{thr=-40\text{ mV}}$ 为阈值等于 -40 mV 时的效率， $Tr(thr)$ 是在阈值 Thr 下已扣除噪音的触发率， $Tr_{thr=-40\text{ mV}}$ 为阈值等于 -40 mV 时已扣除噪音的触发率。利用这种办法近似得到对应阈值下的效率，修正结果参见图 5.25。可以看到效率此时随着阈值的升高逐渐下降，但是这种修正存在几个不足：一是采用阈值等于 -40 mV 的触发率作为标准来归一化的，这就使得阈值小于 $|-40|\text{ mV}$ 的测试点对应的效率大于 1。二是如果采用最小阈值对应的触发率作为标准来归一化，由于阈值过低引入大量噪声，其本身对应的效率变得难以计算准确的。考虑到需要抑制串扰，最终的工作阈值是选择 -40 mV ，但前面提到由于电子学方面的原因，后来才发现实际工作的阈值是 -35 mV 。为了保持一致，始终保持使用 -35 mV 的阈值。需要补充的是，在高能所的模块测试中，使用的工作阈值是 -30 mV 。

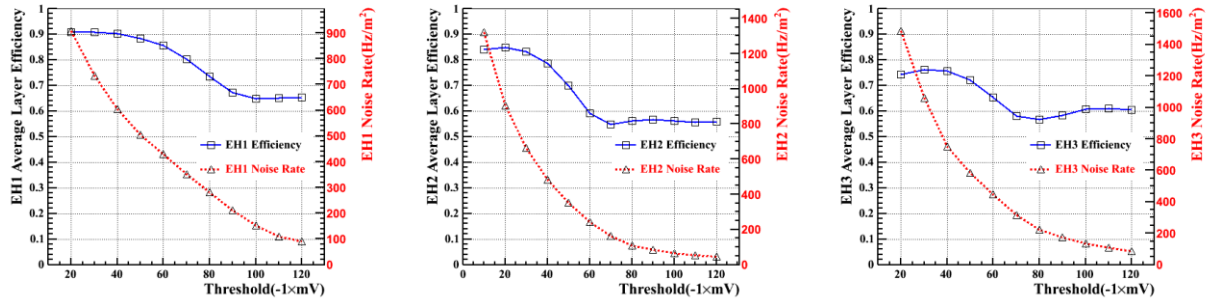


图 5.23 三个厅的效率 and 噪声率随阈值变化的结果

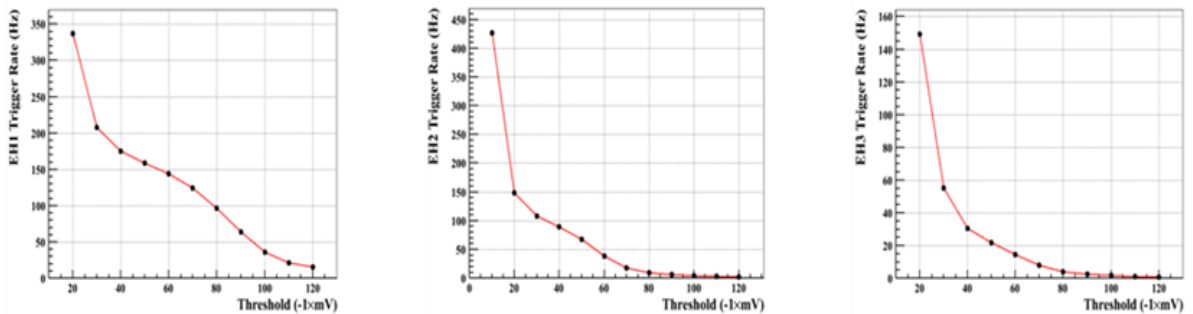


图 5.24 三个厅的触发率随阈值变化的结果

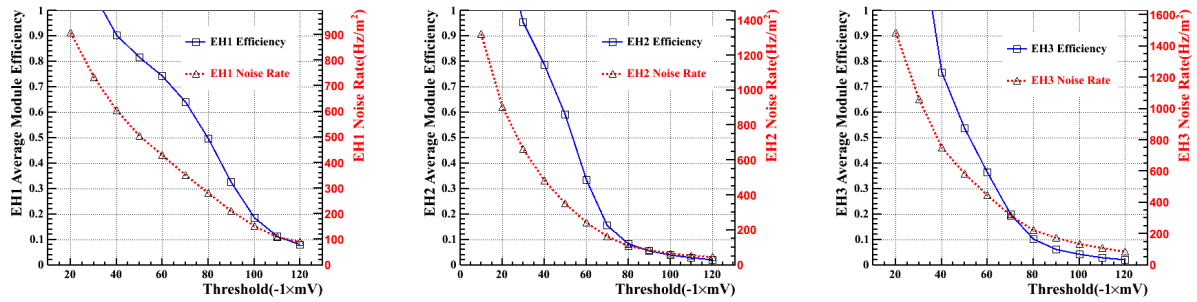


图 5.25 三个厅的基于触发率修正的效率随阈值变化的结果

5.3.3 高压扫描

2012 年 9 月重新对三个厅做了高压扫描（此时探测器停放在矮厅），如所示，效率随着高压的升高逐渐升高。一号厅在 7400 V 开始上坪，二号厅在 8000 V 开始上坪，三号厅在 7400 V 开始上坪。考虑探测器性能的稳定性和高压绝缘性能，最终三个厅的都选择 7600 V 的工作高压。对于二号厅而言，此时尚未上坪，但是高压的电缆长期正常工作的标准就是 ± 4000 V, 由于之前频繁出现高压打火，二号厅最终还是在 7600 V 的工作高压。

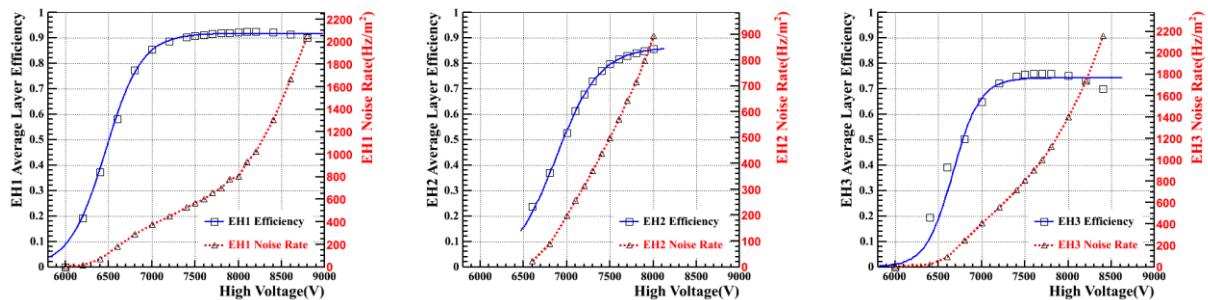


图 5.26 三个厅的高压扫描结果

5.4 本章小结

本章首先介绍了探测器系统的各个组成部分，包括模块、高压系统、气体系统和电子学系统，并且描述了其安装过程中出现的各种问题以及对应的解决办法，最后介绍了触发延迟、阈值和高压的试运行结果和分析。试运行结果表明，在触发延迟设定为 54 时钟周期，阈值为 $|-35|$ mV，高压为 7600 V 时，阻性板室探测器的性能处于最佳的状态。

第六章 探测器离线刻度的算法和结果

离线刻度（offline calibration）是指通过离线（非实时）数据分析的方式研究探测器的性能，对于阻性板室探测器的离线刻度就是给出探测器的探测效率和噪声。其目的是为了更好了解阻性板室探测器的性能，保证阻性板室探测器拥有对 μ 子较高的探测效率，以便提高反符合的效率。整个离线程序是运行在 NuWa 或 LAF[72]环境下，前者是以原始数据（*.data）作为输入，后者是以重建后数据文件（*.root）作为输入，因此后者的处理数据速度要快得多。

6.1 NuWa 离线软件

NuWa是由大亚湾合作组共同开发的一个基于GAUDI分析软件框架[73,74]，集成了Geant4[75]，数据库接口（data base interface）等软件模块，用于离线分析原始数据。GAUDI是用于开发物理数据处理软件系统的公共平台。GAUDI体系结构中的主要组成部分以及它们之间的关系如图 1 所示：算法模块或用户模块（algorithm）,应用管理器（application manager）,瞬态数据缓存（transient data store, TDS）,服务模块(service)。

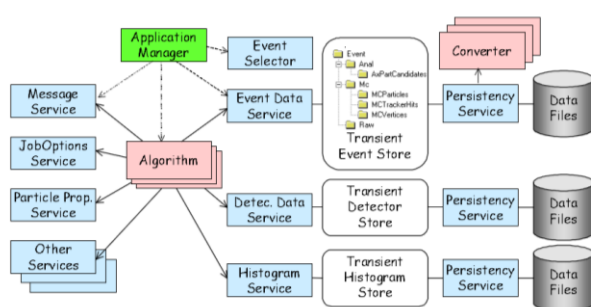


图 6.1 离线分析软件 GAUDI 框架的体系结构

Geant4是模拟粒子穿过物质的软件框架，具有以下模块：几何，探测器响应，运行、事例以及径迹管理、图形显示、用户接口等，并提供了极为丰富的物理过程，广泛应用于高能物理、核物理、加速器物理以及医学和空间科学的研究等。

大亚湾的刻度常数保存在MySQL数据里，通过基于Python编写的脚本程序可以写入和

查询结果。Python作为一种脚本语言，具有简单、功能强大、易学、免费、开源、解释性、可移植性、和类库丰富等优点。特别是同一段内代码强制缩进的要求，使得python程序看起来异常优美：

简单和易学：Python的语法和C或者C++较为接近，因此拥有C或者C++基础的人非常容易上手。通常大家非常喜欢编写运行在ROOT的C++脚本文件，但是有几个问题经常碰到：使用的数组需要初始化其大小，但经常会碰到长度不确定的情况，为此只能使用Vector类，这无疑增加了使用难度，而Python的数组不需要初始化数组大小，因此显得灵活方便，更重要的是在C++中如果数组越界会出现段错误（segment break），但编译器不会提示错误的代码位置，这无疑增加了调试（debug）的难度，而python碰到数组越界会直接提示错误代码位置，这无疑能提高程序开发效率；

功能强大：python作为一门胶水语言，能够很轻松的把用其他语言制作的各种模块（尤其是C/C++）轻松地联结在一起。常用的场合就是在交作业时有时需要调用的shell命令结果，比如当前路径、查找数据文件等，这在Python中只需要执行os.popen('pwd')即可拿到当前路径。并且Python的文本处理功能强大且易用，可以对返回结果进行处理后生成作业文件（*.sh）。事实上C++也能做到，但个人感觉完成这一系列的流程需要的门槛较高。值得注意的是，Python编写的脚本可以调用ROOT的库函数，因此可以编写一个python脚本，内容包括查询数据库的代码、调用Shell命令和ROOT函数，而不需要分别使用不同代码实现所需功能。

免费、开源、解释性、可移植性：Python是自由/开放源码软件之一，因此可以自由地发布这个软件的拷贝、阅读它的源代码、对它做改动、把它的一部分用于新的自由软件中。与C/C++需要将源代码编译后才能执行不同的是，Python作为一种解释型语言，可以直接运行源代码（类似ROOT上直接运行C/C++代码）。而且由于Python解释器把源代码转换成称为字节码的中间形式，然后再把它翻译成计算机使用的机器语言并运行（这种情况类似Java需要通过虚拟机对源代码解释执行），因此Python also 具有很强的可移植性。

丰富的类库：Python标准库极其庞大，涵盖了正则表达式、文档生成、单元测试、线程、数据库、网页浏览器、CGI、FTP、电子邮件、XML等多个方面。值得一提的是，基于Python的sci库，可以绘制出各种图形来，该功能类似ROOT的作图功能[76]。

6.2 电子学信道与读出条的映射

在介绍阻性板室探测器的刻度之前，需要了解电子学编码，探测器、电子学到离线数据的映射。如图 6.2 所示，每个模块的 32 根读出条（strip）构成了 1 个电子学板卡，12 或者 15 个电子学板卡连接到 1 个读出收发器（电子学板卡和读出收发器的映射参见图 6.3），4 个读出收发器（远厅有 6 个读出收发器）连接到每个厅的 VME 插件，该插件负责将数据通过 VME 总线输出数据获取系统的磁盘。因此首先将行、列、层和读出条的信息编码成电子学系统的 CF_ID 和 FEC_ID，离线软件再负责将 CF_ID 和 FEC_ID 解码出行、列、层和读出条的信息。有关电子学信息的解码参考图 6.4 和图 6.5[77]。

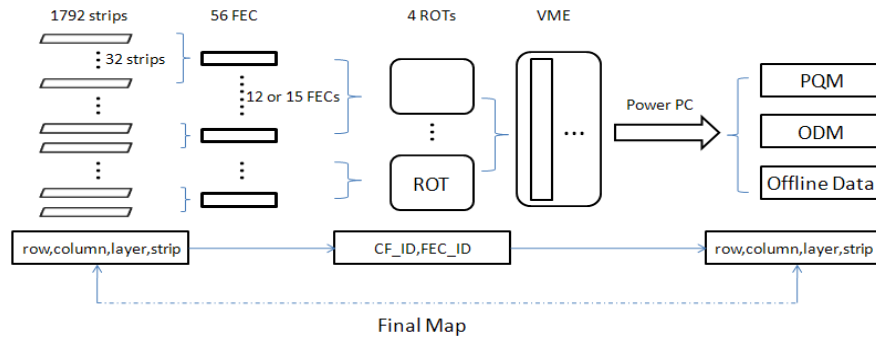


图 6.2 阻性板室探测器的数据流

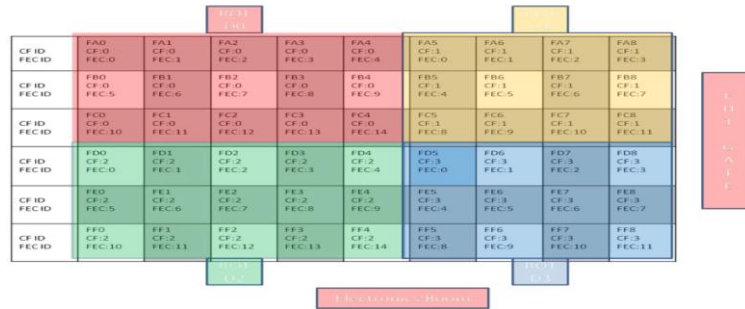


图 6.3 电子学数据映射举例

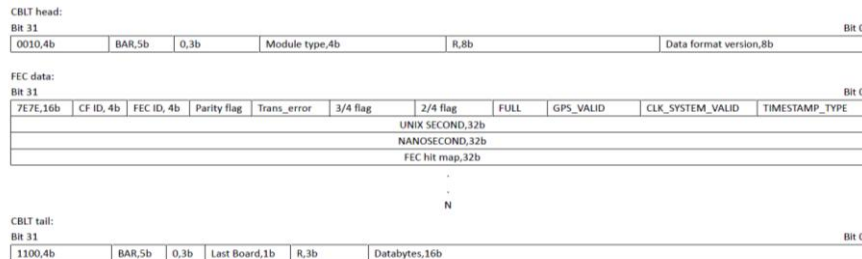


图 6.4 读出模块数据格式

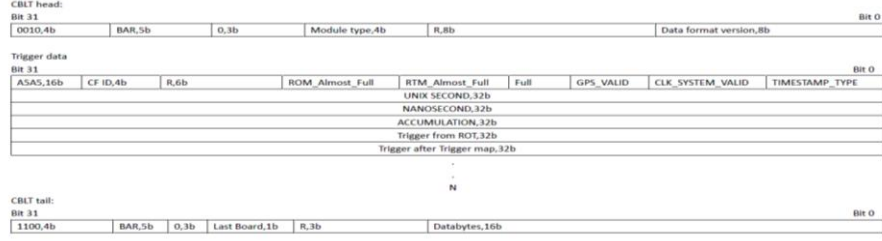


图 6.5 触发模块数据格式

6.3 刻度算法

6.3.1 刻度常数定义

效率是指探测器的实际探测到粒子与粒子总数的比值，效率的高低指明了探测器的性能好坏。对于阻性板室探测器而言，效率包括小方块、层、模块、阵列（array）和系统的效率。噪声的层次包括读出条噪声、层噪声、模块噪声（即一个模块的噪声偶然符合率）、阵列噪声。纯度的含义是指阻性板室触发中包含真实 μ 子触发比例。显然纯度越高，表明由于噪声导致的误触发比例越小。

6.3.2 效率刻度

6.3.2.1 层效率

因为在大亚湾实验中阻性板室探测器作为反符合探测器来探测 μ 子，因此准确计算其探测效率至关重要。阻性板室探测器层效率的计算公式如下：

$$\mathcal{E}_i = \frac{N_{ijkl, R1, R2}}{N_{jkl, R1, R2}} \quad (6.1)$$

其中 $i, j, k, l \in \{1, 2, 3, 4\}$ ，并且 i, j, k 和 l 中互不相等。 $\mathcal{E}_i$ 是给定模块的第 i 层效率， $N_{ijkl, R1, R2}$ 是基于 $R1$ 和 $R2$ 条件下得到的模块 4 层符合数， $N_{jkl, R1, R2}$ 是基于 $R1$ 和 $R2$ 条件下得到的第 j, k 和 l 层的 3 层符合数。 $R1$ 和 $R2$ 的含义将会在后面介绍。图 6.6 显示了一个只有第 j, k 和 l 层有击中的 3 层符合数的事例。

为了能够以更高的纯度挑选 μ 子，需要引入两个挑选条件。第一个条件（Requirement 1, R1）用于压低串扰的影响，具体内容如下：每个事例里触发模块的每一层不允许超过两根读出条同时着火，并且着火的两根读出条必须相邻。由于 μ 子入射时会击中两根读出

条之间的缝隙，形成流光信号有可能导致这两根读出条同时着火。如果仅是单一 μ 子入射，是不可能导致同一层两根非相邻的读出条同时着火，这其中至少有一根是噪声。反之如果 μ 子簇射，是有可能导致多根读出条同时着火（包括非相邻的），但是由于阻性板室模块本身存在串扰，使得多根读出条同时着火，单纯依靠阻性板室探测器的自身数据无法有效区分这两种情况。因此在后端计算时只能将这两种情况一起排除。

第二个条件（Requirement 2, R2）是一个在阻性板室探测器触发打开的 600ns 符合窗口内需要包含水池标记的 μ 子，也就是在 600 ns 窗口内需要这两个探测器有符合信号。R2 压低了由于偶然符合和其它仅和阻性板室探测器相关本底导致低估效率的效应，比起探测器位于海平面探测 μ 子，对于在地下环境探测 μ 子这种低计数率环境下，这一点是必不可少的。举个例子而言，在未使用 R2 但使用 R1 的情况下，从三个厅随机抽取一个模块的任意一层可以看到层效率分别是 $(96.42 \pm 0.03)\%$ ， $(95.9 \pm 0.03)\%$ 和 $(80.77 \pm 0.25)\%$ ，在同时使用 R1 和 R2 之后对应的层效率 $(97.04 \pm 0.03)\%$ ， $(96.88 \pm 0.03)\%$ 和 $(97.06 \pm 0.13)\%$ ，而这一结果与在海平面之上的高能所测试结果吻合[48]。图 6.7 显示三个厅的各个模块各层加 R2 cut 前后层效率的变化，可以看到一号厅和二号厅的效率比原来高了 1%到 2%，而三号厅的效率变化显著，比原来高了 17%。这是由于三号厅的 μ 子通量比一号厅和二号厅的低了一个数量级，3/4 偶然符合率和 μ 子通量同在一个数量级，其信噪比较低，需要借助水池的信息才能挑选出干净的 μ 子来刻度探测器。从这个意义上，三号厅的阻性板室探测器是难以可靠的给出 μ 子信息，必须借助水池的信息才能达到目的。因此如果大亚湾 2 期还需要利用阻性板室探测器有效探测 μ 子的话，就必须进一步再降低其偶然符合率（理论估算 2 期实验大厅的 μ 子通量将比三号厅低一个数量级），以当前阻性板室探测器的性能，需要选择 6 层或者更多的阻性板室层数才能满足条件。

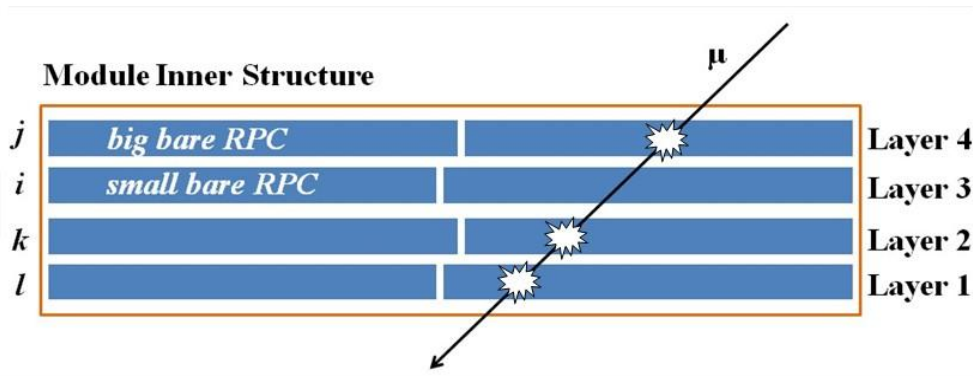


图 6.6 层效率计算时所用的 3 重符合事例

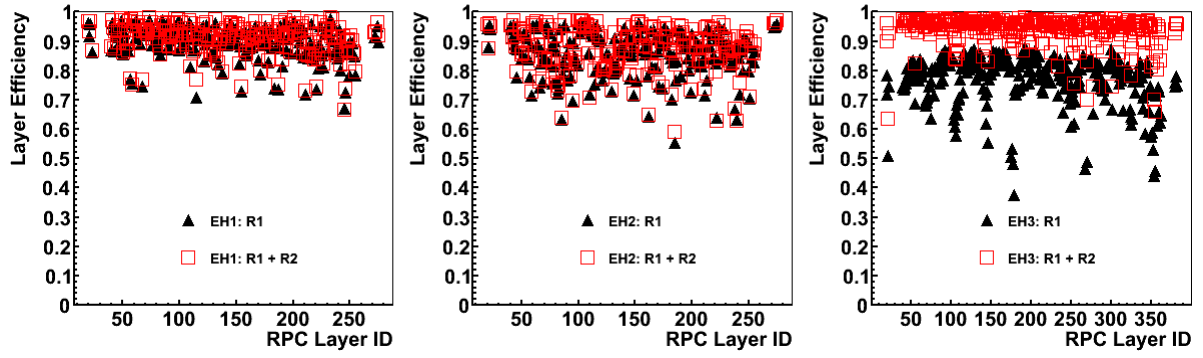


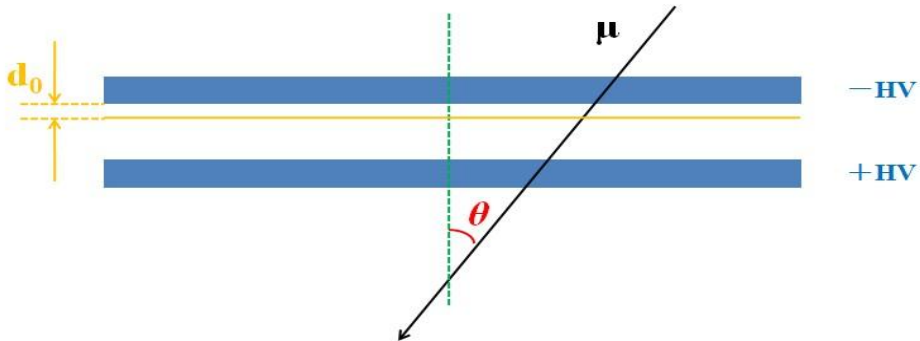
图 6.7 使用 R2 cut 的前后效果比较

由于在刻度中不得不使用水池的信息，因此存在一个担忧是 μ 子入射角度偏差会导致较大的效率偏差。考虑到由其它探测器重建的 μ 子径迹给出有限的空间分辨（最好能达到 0.5 m）和样本偏差，对于 R2 的角偏差只能从理论角度入手。大亚湾的阻性板室探测器工作在流光模式，因此如图 6.8 所示，只有离阴极板内表面一定距离（ d_0 ）的原初电离才能生成可被探测的流光信号（即需要大于阈值），因而只有一个自变量为 μ 子的入射角度 θ 的效率函数 ε 可写为以下表达式：

$$\varepsilon(\theta) = 1 - P(X = 0 | \theta) = 1 - e^{-\frac{n d_0}{\cos \theta}} \quad (6.2)$$

其中 $P(X=0|\theta)$ 表示在距离 d_0 内不产生原初电离的泊松几率， n 是单位长度的离子-电子对数目。假如当 $\theta = 0$ 的对应效率已知，公式可简写为：

$$\varepsilon(\theta) = 1 - e^{\frac{\ln(1 - \varepsilon(0))}{\cos \theta}} \quad (6.3)$$


 图 6.8 由于 μ 子的入射角度不同造成效率偏差的估算

假定 $\varepsilon(0) = 95\%$ ，可以得到效率对 μ 子入射角度 θ 的依赖关系。对于每个实验厅，模拟程

序中已知 μ 子入射角度的分布。所以可以利用探测器几何和 μ 子入射角度，计算出有关偏差。如图 6.9 和图 6.9 所示，当 $\varepsilon(0) = 95\%$ 或者 $\varepsilon(0) = 80\%$ 时，三个厅的所有模块对应的效率分布情形，可以看到分布在水池边缘的模块对应的效率偏差较大。如表 6.1 所示，当 $\varepsilon(0) = 95\%$ 时，三个厅的效率偏差 ($\varepsilon_{R2} - \varepsilon_{No_R2}$) 平均值在 0.05% 左右。当 $\varepsilon(0) = 80\%$ 时，三个厅的效率偏差平均值在 0.2% 左右。因此考虑到引入 R2 能够有效降低诸如串扰、偶然符合和伽马本底这些效应低估效率的作用（一号厅和二号厅分别为 2%，三号厅为 17%），其引入的效率偏差可以忽略不计。

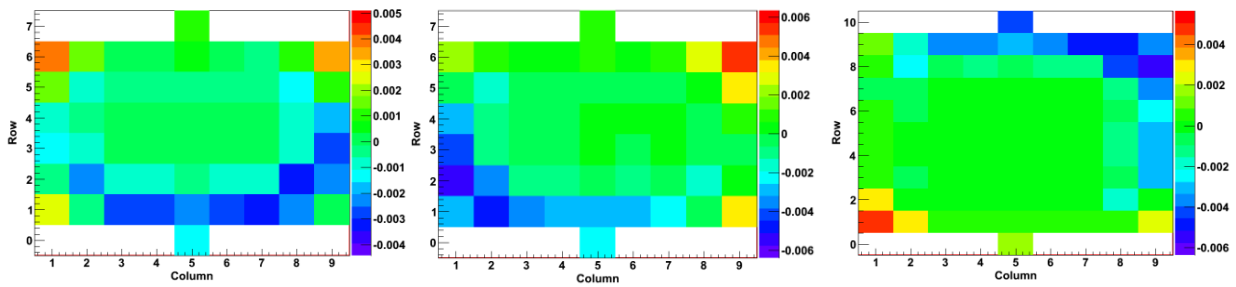


图 6.9 三个厅当 $\varepsilon(0) = 95\%$ 时，R2 引入的角偏差造成效率偏差的估算

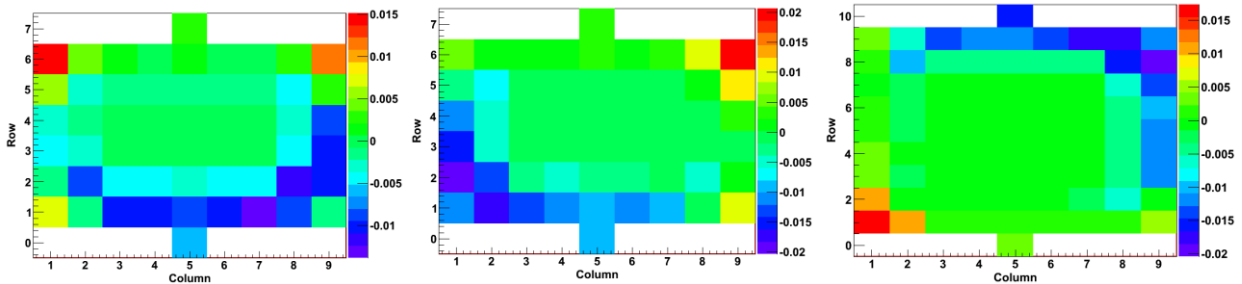


图 6.10 三个厅当 $\varepsilon(0) = 80\%$ 时，R2 引入的角偏差造成效率偏差的估算

Layer Efficiency	95% (Max)	95% (Average)	80% (Max)	80% (Average)
一号厅	0.40%	-0.05%	1.4%	-0.2%
二号厅	0.54%	-0.05%	2.0%	-0.2%
三号厅	0.55%	-0.07%	2.0%	-0.3%

表 6.1 层效率分别等于 80% 或者 95% 时各个厅对应的效率偏差

如图 6.11、图 6.12 和图 6.13 显示 2012 年 12 月 24 日正式运行的一、二和三号厅首次运行数据的层效率分析结果，刻度得到三个厅四层的层效率 2 维图。可以看到一号厅除了位于第 6 行和第 7 列的模块的第二层效率明显偏低外，其它层效率还可以接受，但是二

号厅的各层的层效率整体状况不是很好，相比之下三号厅的总体性能是最好的。图 6.14 显示三个厅的所有层效率的 1 维分布，图 6.15 对三个厅的所有层效率进行统计，其中一号厅的层效率均值为 $(90.57 \pm 5.5)\%$ ，二号厅的层效率均值为 $(87.02 \pm 7.6)\%$ ，三号厅的层效率均值为 $(93.77 \pm 5.0)\%$ 。性能较好的一号厅和三号厅的层效率均值大于 90%，但是 RMS 大于或等于 5.0%，说明一号厅和三号厅的层效率整体一致性并不是很好，也就是说低效率的模块较多。

这里面有 2 个现象可以注意到：

1) 三个厅的效率高低顺序是三号厅 > 一号厅 > 二号厅。造成这种顺序的原因是，阻性板室模块最先在一号厅安装，由于洞顶天花板滴水，造成部分模块打火，还有一部分低效率的模块（由于安装前模块长期存放在隧道，隧道内部极高的湿度的潮气损坏了阻性板）也一起被替换了。这些淘汰的模块在经过修理（使其不再打火）后，安放在二号厅。因此低性能的模块主要集中在二号厅。三号厅的模块也有一些一号厅和二号厅淘汰下来的低性能模块，它们被安装在水池边缘。另外三号厅的大部分模块从北京运输过来后，没有在隧道存放，直接就在三号厅安装了，因此这些模块的性能比一号厅的好。

2) 各个厅的第一层（最底层）效率较高，随着层数增高效率逐渐降低。装配模块时各层的裸室是随机抽取的，理论上这四层效率应该趋于一致才对。在确认算法可靠的基础上，最后研究得到的结果是由于这四层阻性板的位置不同使得其承受到的压力不一样，造成阻性板内部气隙不同。压力大导致内部气隙小（接近 2 mm），因此在最底层（第一层）的阻性板气隙小，内部能够保持足够高的电场强度使得其探测效率高，反之最顶层的阻性板由于开裂和受到的压力小，使得气隙大于 2 mm，因此探测效率较低。该问题在后面还会做进一步的深入讨论。

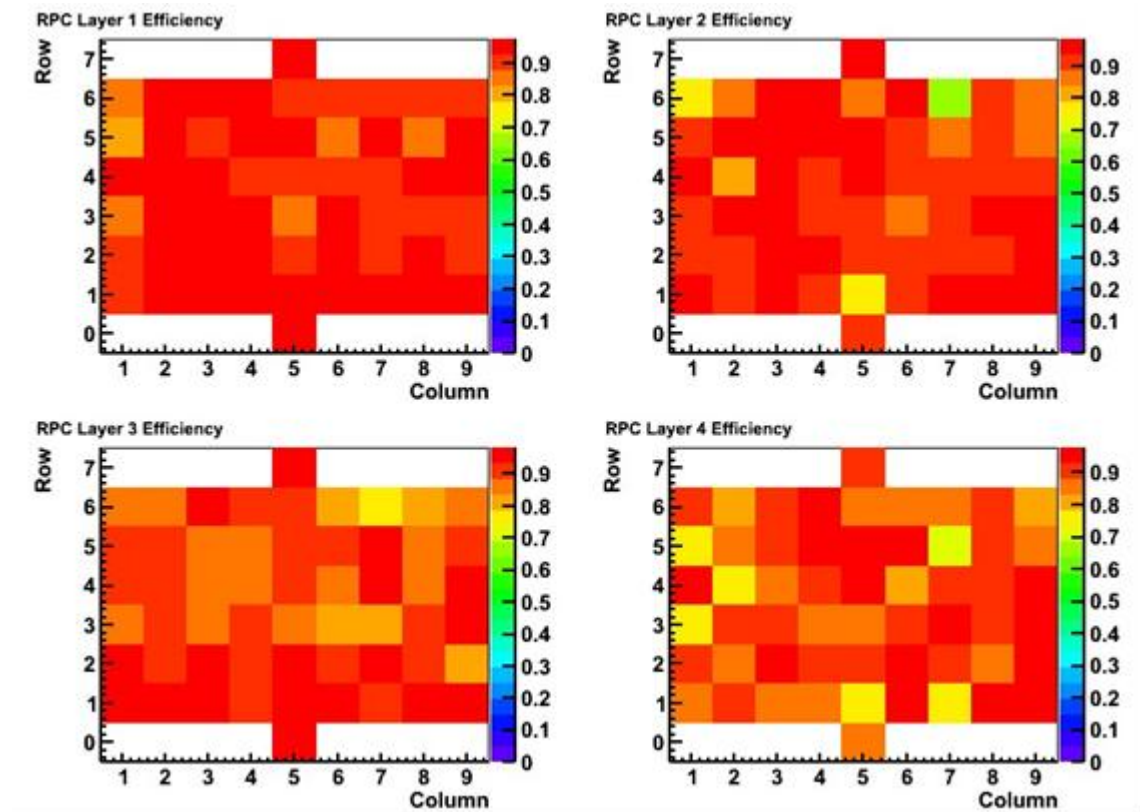


图 6.11 一号厅的层效率的 2 维图

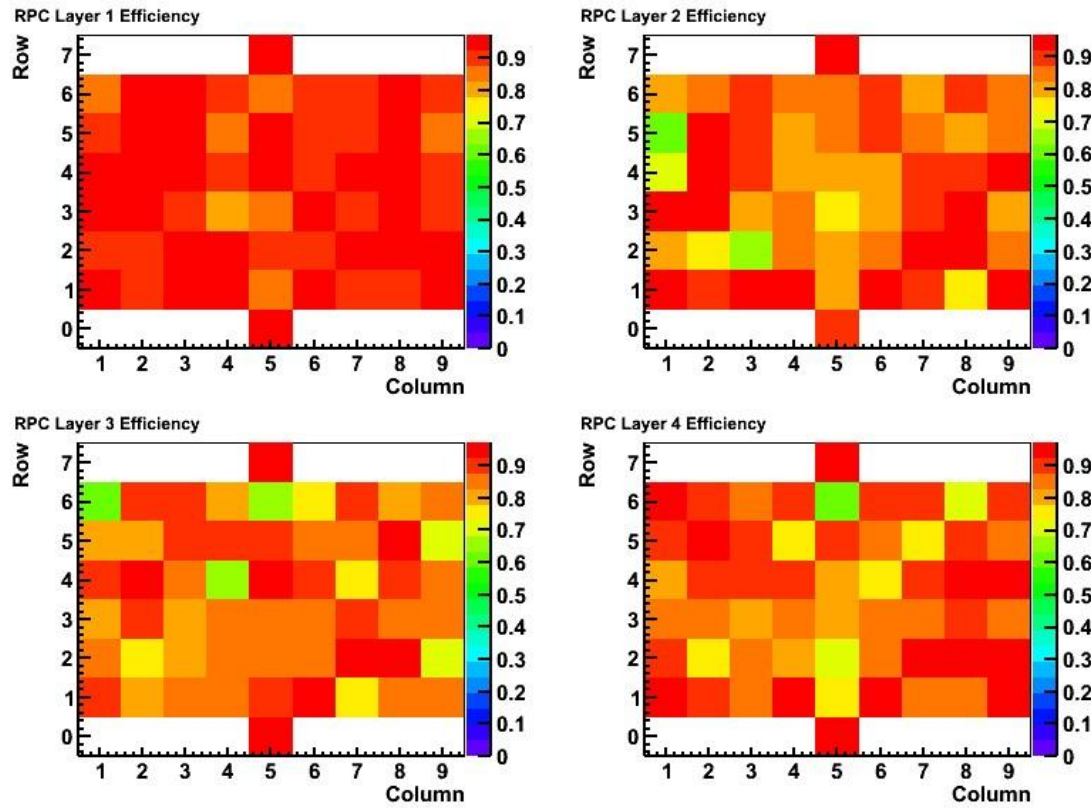


图 6.12 二号厅的层效率的 2 维图

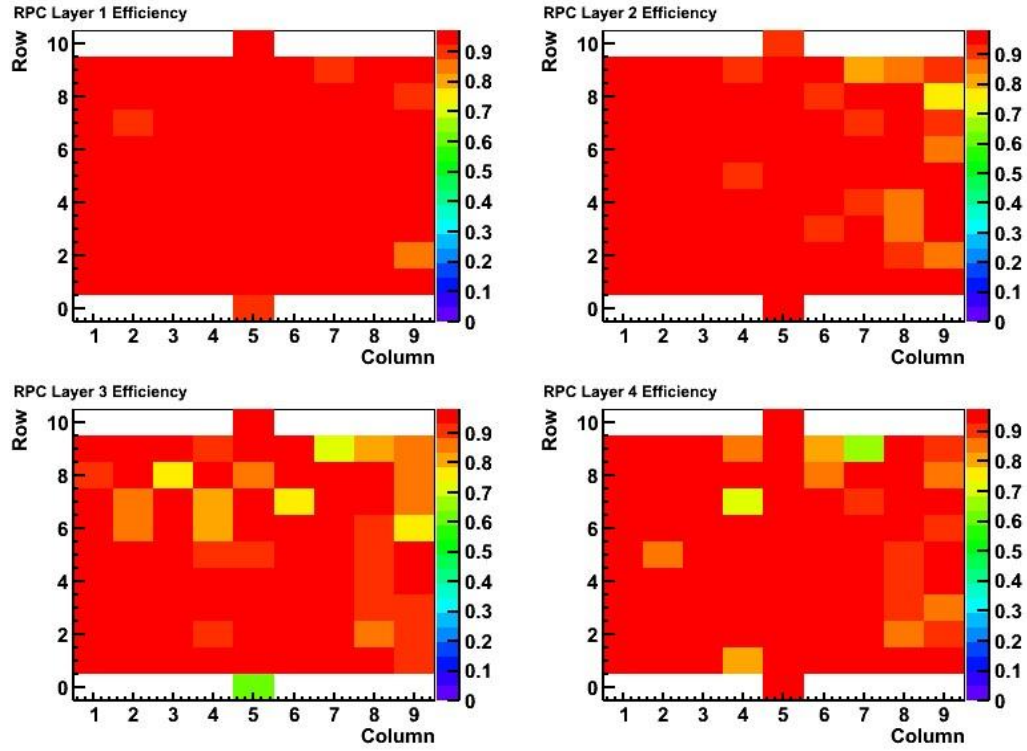


图 6.13 三号厅的层效率的 2 维图

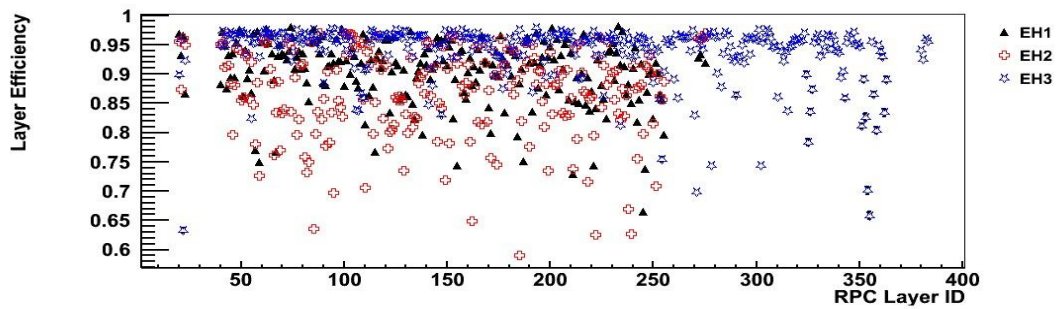


图 6.14 三个厅的层效率分布

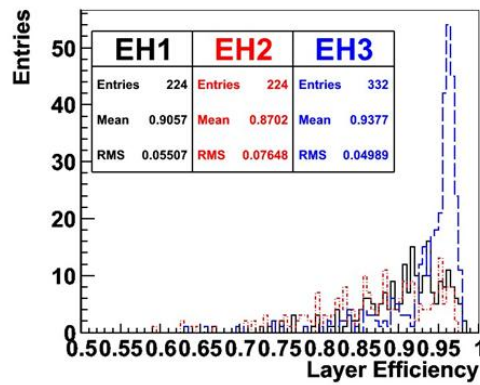


图 6.15 三个厅的层效率统计

6.3.2.2 模块效率

考虑到 3 层或者 3 层以上同时着火才能产生触发，如果各层的效率相同，模块的 3/4 效率可以按公式(3.9)计算，如果各层的效率不同，可将公式变形为：

$$\varepsilon_{m/n} = \varepsilon_{3/4} = \prod_{i=1}^{n=4} \varepsilon_i + \sum_{i=1}^{n=4} \left((1 - \varepsilon_i) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n=4} \varepsilon_j \right) \quad (6.4)$$

从三个厅随机抽取一个模块的任意一层可以得到四层的层效率分别是 $(95.36 \pm 0.15)\%$ 、 $(97.56 \pm 0.11)\%$ 、 $(95.76 \pm 0.14)\%$ 和 $(97.02 \pm 0.12)\%$ ，因此 $\varepsilon_{3/4}$ 是 $(99.28 \pm 0.03)\%$ 和 $\varepsilon_{4/4}$ 是 $(86.43 \pm 0.24)\%$ 。从图 6.16、图 6.17 和图 6.18 可以看到，二号厅的 3/4 探测效率较低，原因就是由于各层效率偏低所致。图 6.19 显示三个厅的所有模块效率的 1 维分布，图 6.21 对三个厅的所有模块效率进行统计，其中一号厅的模块效率均值为 $(95.13 \pm 3.2)\%$ ，二号厅的模块效率均值为 $(90.11 \pm 5.5)\%$ ，三号厅的模块效率均值为 $(97.53 \pm 3.1)\%$ 。性能较好的一号厅和三号厅的模块效率均值大于 95%，但是一号厅的 RMS 大于 5%，说明一号厅的模块效率整体一致性并不是很好。二号厅的模块效率才达到 90%，这离预定目标还有一段距离。模块 4/4 效率计算公式，可以由公式(6.4)简单变形得到：

$$\varepsilon_{m/n} = \varepsilon_{4/4} = \prod_{i=1}^{n=4} \varepsilon_i \quad (6.5)$$

如图 6.20 显示三个厅的 4/4 模块效率分布，图 6.22 给出了三个厅的 4/4 模块效率统计。它们表明了三个厅的 4/4 模块效率分布较为发散。

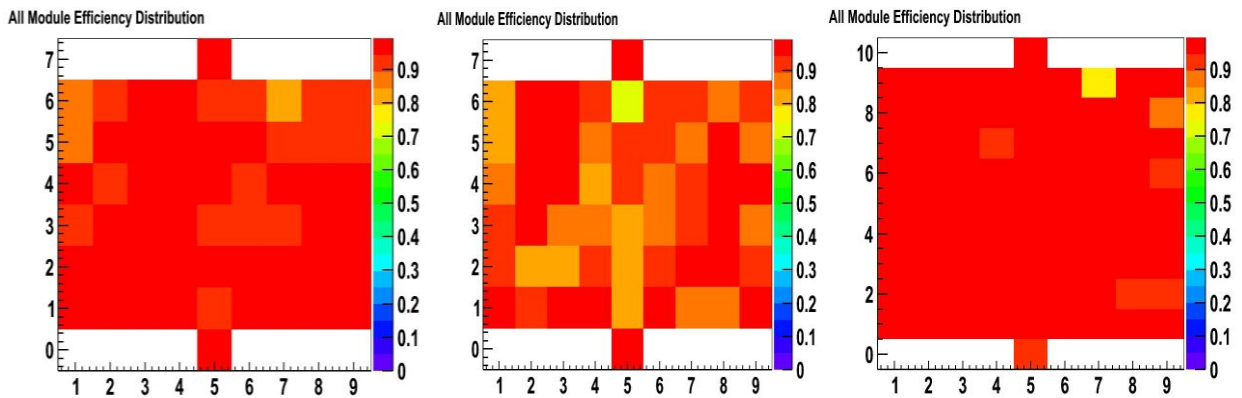


图 6.16 一号厅 3/4 效率 2 维图

图 6.17 二号厅 3/4 效率 2 维图

图 6.18 三号厅 3/4 效率 2 维图

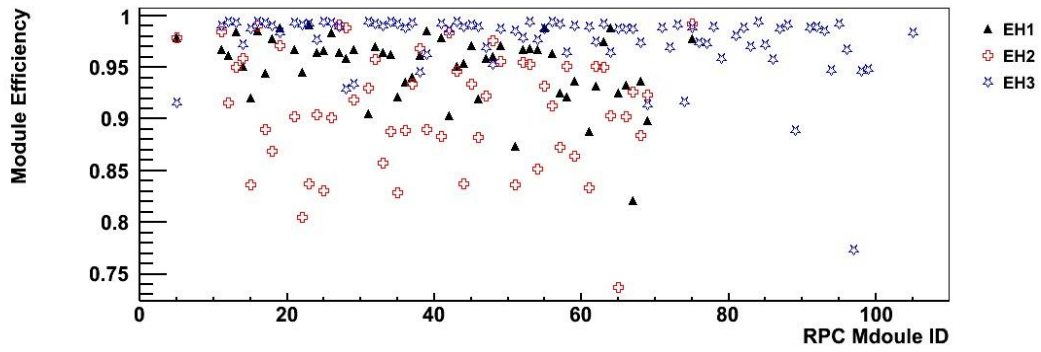


图 6.19 三个厅的 3/4 模块效率分布

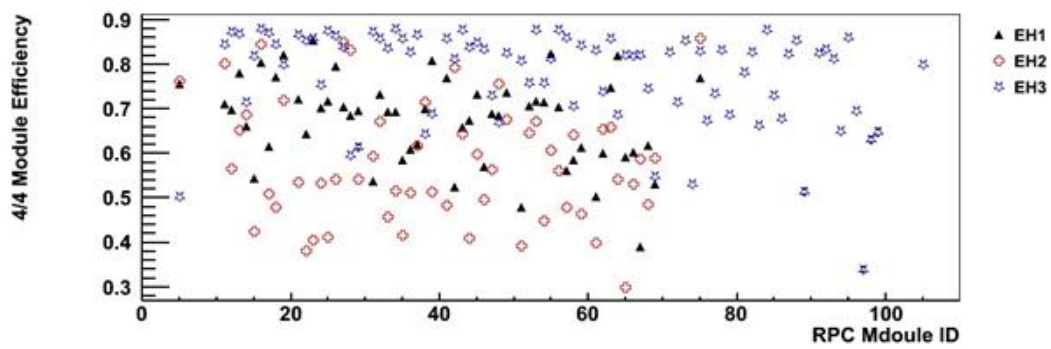


图 6.20 三个厅的 4/4 模块效率分布

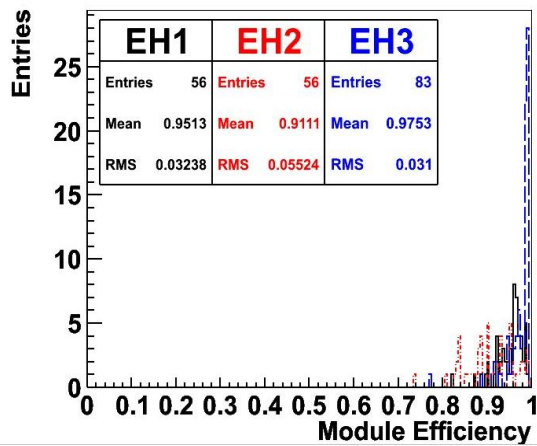


图 6.21 三个厅的 3/4 模块效率统计

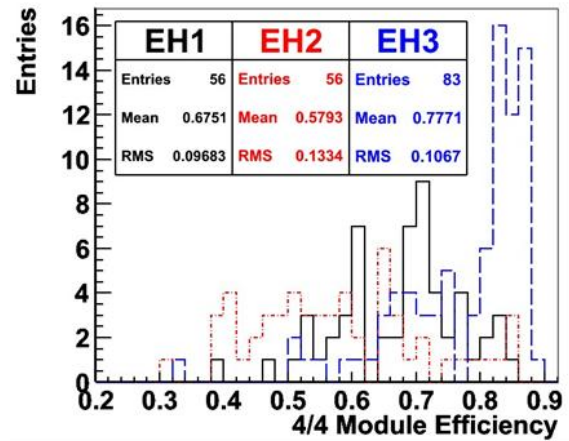


图 6.22 三个厅的 4/4 模块效率统计

6.3.2.3 系统效率

由于安装在支撑架上的各列模块相互间存在错位、间隙和重叠，以及阻性板室探测器、水切伦科夫探测器和反中微子探测器三者的空间方位，因此无法根据实验数据直接计算出阵列的系统效率的。所以将真实的探测器几何和计算得到的层效率作为模拟程序的输入来

估算系统效率。如果能够验证系统效率的可靠性，就能间接验证层效率算法的可靠性。为此需要挑选出既通过水池又通过两个望远镜阻性板室模块（实际是望远镜模块靠近水池的那一半区域，这样才能确保 μ 子的径迹经过阵列）的 μ 子来计算阵列效率，如表 6.2 所示，将得到的结果和系统效率作比较，相互验证。可以看到两者吻合较好。

表 6.2 基于两种方法得到的阵列效率

	一号厅	二号厅	三号厅
系统效率	92.9% $\pm$ 0.4%	88.7% $\pm$ 0.5%	95.3% $\pm$ 0.6%
基于水池和望远镜阻性板室得到的效率	93.5% $\pm$ 0.1%	88.0% $\pm$ 0.2%	95.8% $\pm$ 0.7%

6.4 噪声率刻度

6.4.1 层噪声率刻度

阻性板室探测器的噪声水平可以用噪声率和暗电流来表征，而探测器的层噪声率可以用来估算偶然符合率和纯度，从另一个方面来研究探测器的性能，其计算公式如下：

$$f_i = \frac{N_i}{A \times n \times T} \quad (6.6)$$

其中 f_i 是一个模块第 i 层的噪声率， N_i 是强制触发累积得到的第 i 层的噪声数， n 是强制触发的次数， T 是每次强制触发的采样时间（=信号窗口的典型宽度 T_w + 数字化阻性板室探测器信号的典型宽度 $T_s = 400 \text{ ns} + 150 \text{ ns} = 550 \text{ ns}$ ）。由于电子学对阻性板室原始信号采用跟随机制，也就是说并非输出固定宽度的数字化阻性板室信号（即过阈电平信号），而是追随原始信号的宽度每次过阈和展宽成不同宽度的数字化探测器信号，但其典型值是 150 ns，然后每次用 400 ns 宽度的信号窗口去符合，因此二者叠加使得采样时间最长为 550 ns。

如图 6.23、图 6.24 和图 6.25 显示 2012 年 12 月 24 日正式运行的 1、2 和三号厅首个运行数据的层噪声分析结果，可以看到三个厅的层噪声水平差不多。图 6.26 显示三个厅的所有层噪声的 1 维分布，图 6.27 对三个厅的所有层噪声进行统计，其中一号厅的层噪声均值为 856.3 Hz/m²，二号厅的层噪声均值为 950.0 Hz/m²，三号厅的层效率均值为 790.8 Hz/m²。三个厅的层噪声均值小于设计的指标 1000 Hz/m²。值得注意的是，三个厅的各层噪声率的顺序大小和效率的顺序一致。

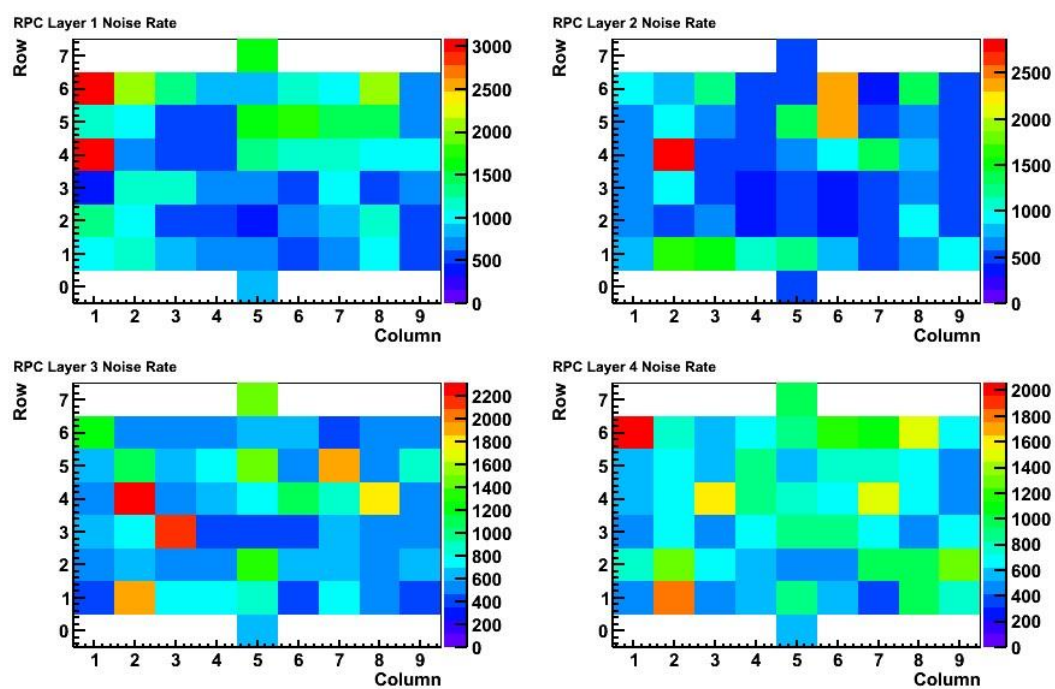


图 6.23 一号厅的层噪声的 2 维图

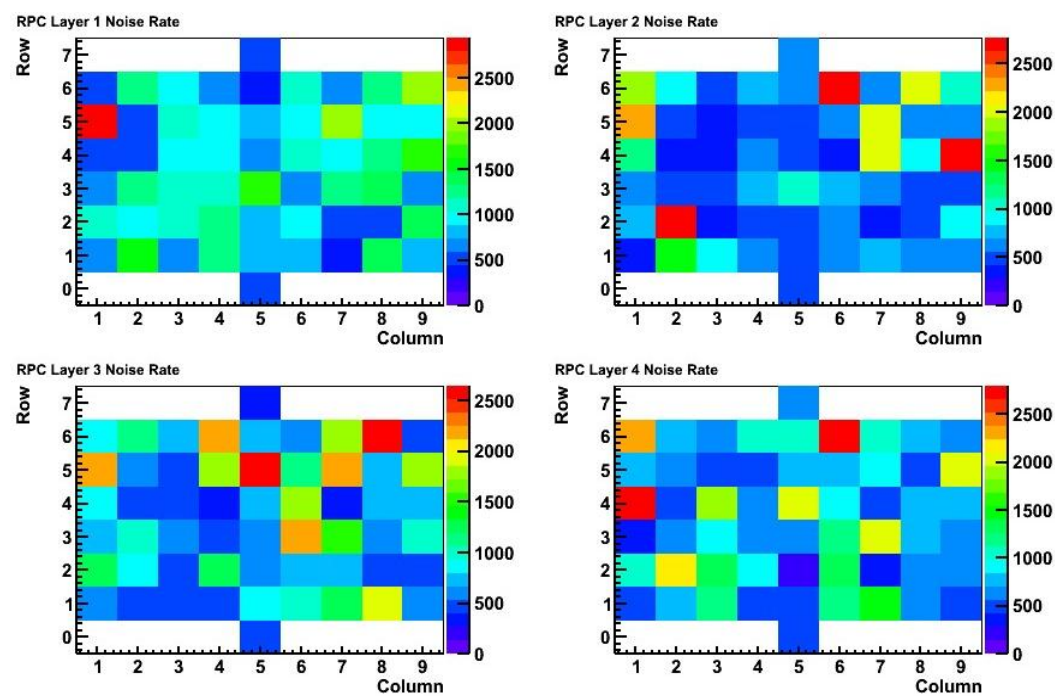


图 6.24 二号厅的层噪声的 2 维图

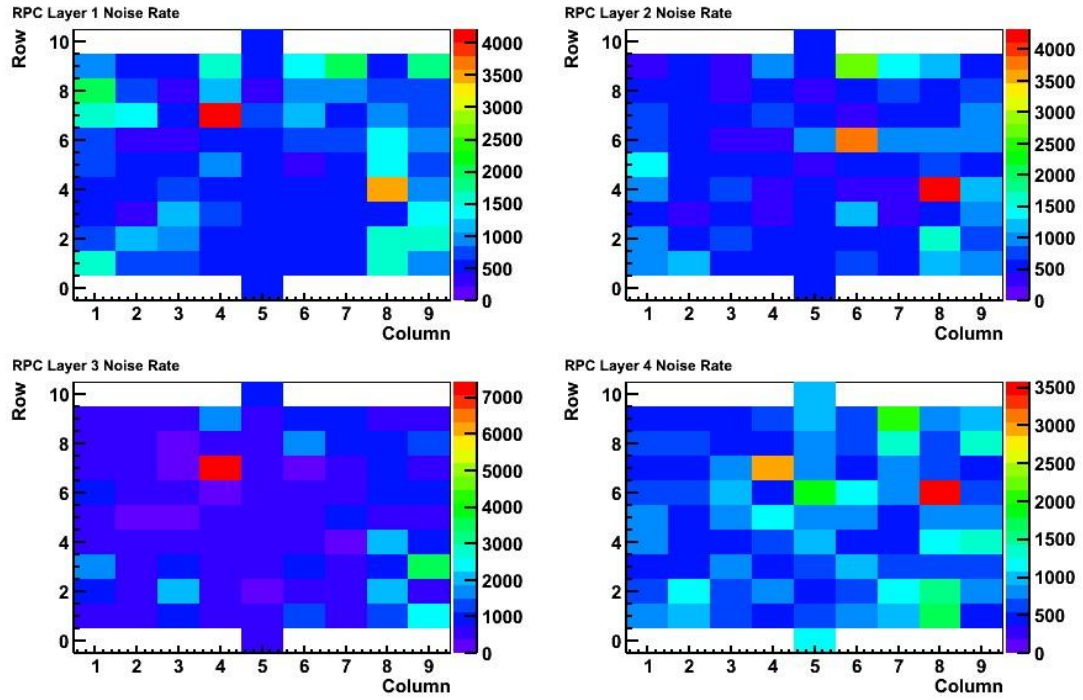


图 6.25 三号厅的层噪声的 2 维图

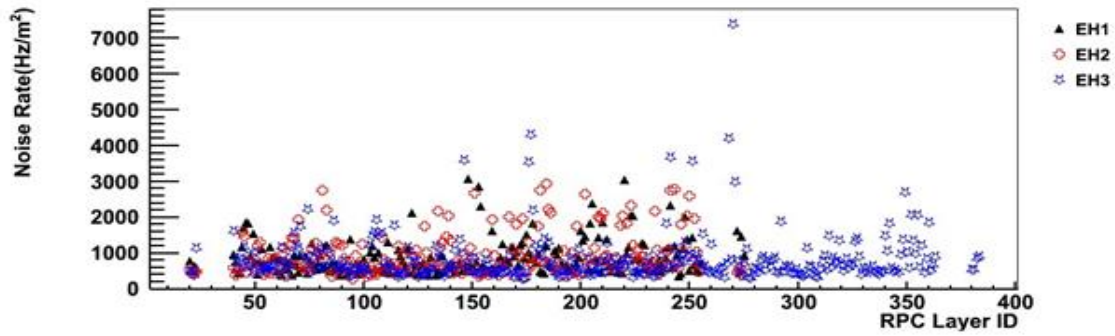


图 6.26 三个厅的层噪声分布

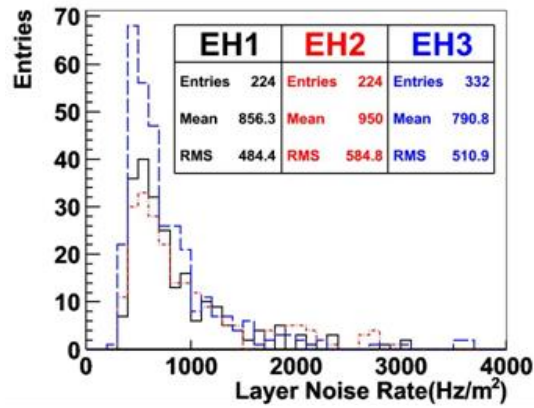


图 6.27 三个厅的层噪声统计

6.4.2 模块噪声率刻度

3/4 模块噪声率（即偶然符合率）是一种能够降低探测器触发纯度的因素。如果各层的噪声率相同，3/4 的偶然符合率可以采用公式(3.10)来计算；如果各层的噪声率不相同，可以采用以下公式计算：

$$R_{3/4, Acc} = \frac{1}{T_s} \left(4 \prod_{i=1}^4 A T_s f_i + 3 \sum_{i=1}^4 \left((1 - A T_s f_i) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 A T_s f_j \right) \right) \quad (6.7)$$

图 6.28 给出了三个厅的模块噪声分布，可以看到某些模块的 3/4 噪声率异常高。图 6.29 是对图 6.28 的局部放大，可以发现大部分模块的 3/4 噪声率都低于 1 Hz/module，图 6.31 表明三个厅的 3/4 噪声率均值分别是 0.06 Hz/module，0.09 Hz/module 和 0.05 Hz/module。图 6.30 和图 6.32 表明三个厅的 4/4 噪声率均值都是在 10^{-6} 量级，因此在进行探测器偶然符合本底估算，可以忽略 4/4 噪声率。4/4 模块噪声率计算公式，可以由公式(6.7)简单变形得到：

$$R_{4/4, Acc} = 4 A^4 T_s^3 \prod_{i=1}^4 f_i \quad (6.8)$$

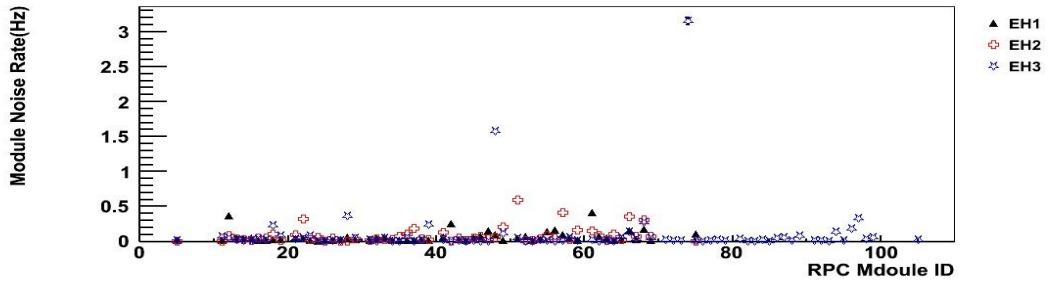


图 6.28 三个厅的模块噪声分布

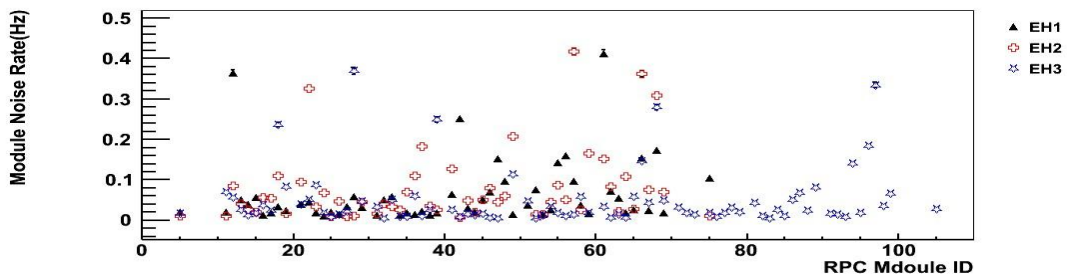


图 6.29 放大的三个厅的 3/4 模块噪声分布

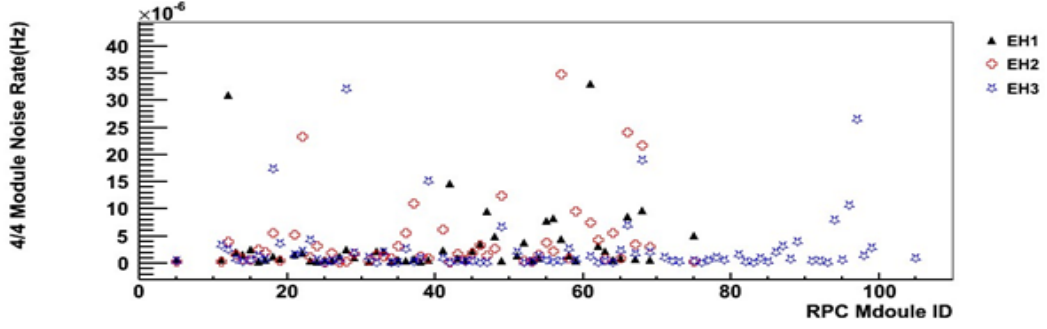


图 6.30 三个厅的 4/4 模块噪声分布

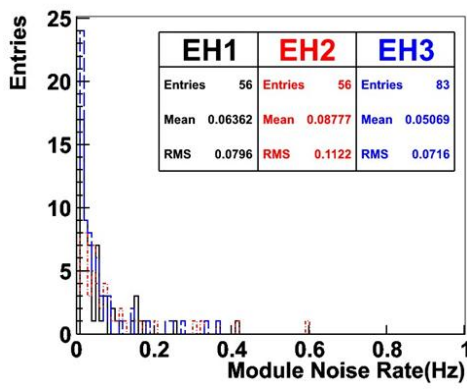


图 6.31 三个厅的 3/4 模块噪声统计

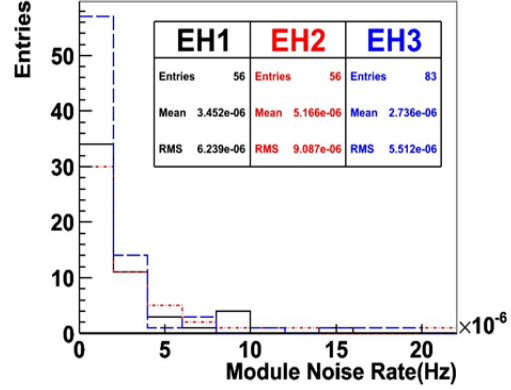


图 6.32 三个厅的 4/4 模块噪声统计

6.5 纯度刻度

纯度的含义是指阻性板室触发中包含真实 μ 子触发比例，用于表征探测器的触发有效性。纯度越高，意味着探测器受到噪声影响产生的误触发越低。纯度的计算公式如下：

$$Purity = \frac{N_{3/4, R2}}{N_{3/4}} \times \frac{N_{4/4}}{N_{4/4, R2}} \quad (6.9)$$

$N_{3/4, R2}$ 和 $N_{4/4, R2}$ 分别是采用 R2 条件下 3/4 和 4/4 的事例数。这种计算方法基于三个假设：由于 4/4 的偶然符合率极低 ($(4.5 \pm 0.2) \times 10^{-7}$ Hz/module), $N_{4/4}$ 仅仅包含 μ 子的数目； $N_{3/4, R2}$ 和 $N_{4/4, R2}$ 是基于水池抽样得到的 μ 子的数目；由前两个假设得到以下等式：

$$\frac{N_{3/4, muon}}{N_{3/4, R2}} = \frac{N_{4/4}}{N_{4/4, R2}} \quad (6.10)$$

因为 3 重符合对本底更加敏感，所以本底将会通过 $N_{3/4, muon}$ 进入计算中。随机抽取一号厅

的模块得到的纯度是 97.4%。

6.6 μ 子通量计算

为了尽可能减少计算 μ 子通量时来自本底的干扰，故挑选满足四重符合条件的事例来计算。考虑到需要对效率、死时间和来自噪声的 4/4 偶然符合的修正，因此得到以下计算 μ 子通量的公式：

$$F_{\mu} = \frac{\frac{R_{4/4}}{1 - R_{3/4} \times A \times T_w} - R_{4/4, Acc}}{\epsilon_{4/4}} \quad (6.11)$$

其中信号窗口的典型宽度 T_w 是 400 ns。事实上 1 秒中内的 3/4 事例产生的死时间 $= R_{3/4} \times A \times T_w = \sim 1 \text{ Hz/m}^2 \times 4.28 \text{ m}^2 \times 400 \times 10^{-9} \text{ s} = \sim 2 \times 10^{-6}$ ，而来自 4/4 偶然符合产生的本底更小。但是对于某些具有高噪声率和冒道的模块而言，确是难以忽略的。最后得到的 μ 子通量是 1 个实验厅内所有模块的结果平均值。

表 6.3 三个实验厅的 μ 子通量模拟和实测结果比较

	一号厅	二号厅	三号厅
模拟结果 (Hz/m ²)	0.88 ± 0.09	0.69 ± 0.07	0.039 ± 0.004
阻性板室探测器测量结果 (Hz/m ²)	0.90 ± 0.06	0.69 ± 0.08	0.046 ± 0.004

6.7 本章小结

本章介绍了如效率、噪声率、纯度和 μ 子通量等各项探测器的性能指标的计算方法，并给出了各个实验厅对应的刻度结果，同时采用以望远镜模块和水池作为望远镜系统计算阵列的效率的方法，对采用当前的刻度算法计算得到的结果进行验证，结果表明二者是在误差范围内相符。在最后的阶段，还将 μ 子通量的模拟结果和计算结果作了比较，结果也是较为吻合。

第七章 探测器性能稳定性研究

尽管刻度软件开发工作已经完整，但是为了确保探测器运行稳定可靠，需要对其各方面的性能进行长期跟踪，及时发现存在的问题和采用可能的解决办法，如此保证探测器的稳定运行。

7.1 探测器性能长期性跟踪

探测器的性能可以首先通过分析触发率、效率等方面入手，下面这些图显示了三个厅自 2011 年 12 月 24 日开始取数以来，探测器触发率、效率等随时间变化的趋势图。可以看到这些图反映的特征：

1. 自从三个厅同时正式取数以来，探测器的触发率、效率和噪声一直在降低，尤其是二号厅效率下降得较快。这说明存在某种因素使得探测器的性能变坏。后面将详细探讨根源。

2. 如图 7.1、图 7.2 和图 7.3 所示，在 3 月份底探测器的触发率、效率和噪声忽然升高，这是为了改善较差的探测器性能，将探测器的工作高压从 7400 V (± 3700 V) 提高到 7600 V，使得短时间探测器的触发率、效率和噪声忽然上升。

3. 各个图的中间一段空白是夏季检修探测器停止取数形成的，在十月份探测器重新开始工作。但即使经过检修，探测器的性能还是在不断下降。

4. 图 7.5 表明一号厅的模块整体较为稳定，图 7.6 表明二号厅的情况比一号厅的差一些，但是图 7.7 显示五、六月份之后三号厅的正常工作模块数目急剧下降。根据值班人员的记录，这段时间主要是三号厅水池边上的靠着大厅门口的最外面一列频繁打火 (Column 1)。前面提到由于性能较好的模块数目不够，所以一些淘汰下来的模块只好安装在水池边缘。这些模块内部阻性板原先在隧道存放时受潮，绝缘性能下降，在深圳夏天到来之际，湿度升高时探测器就会频繁出现打火。

无论是什么因素导致探测器性能下降，探测器状态不稳定使得物理分析难以使用其数据，因此需要寻找致使探测器性能下降的真正原因。

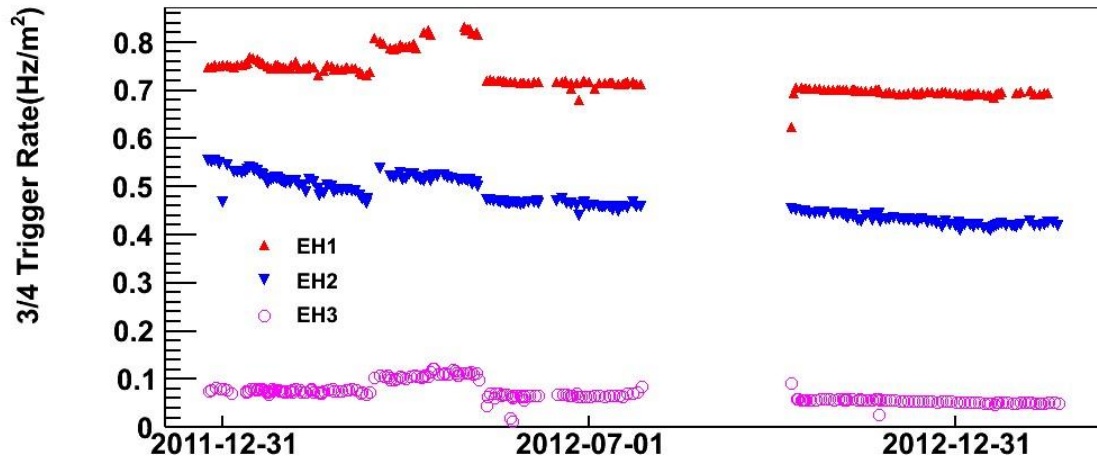


图 7.1 三个厅的触发率随时间变化图

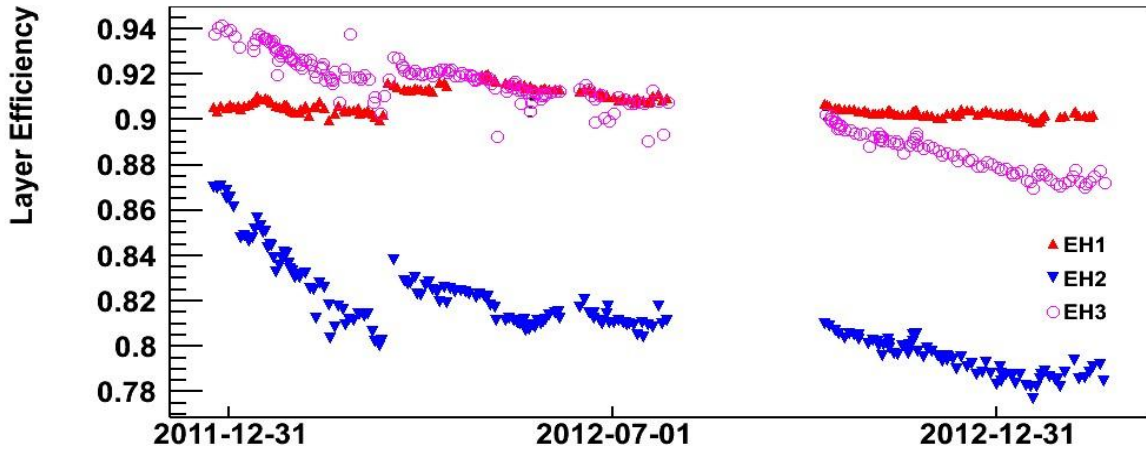


图 7.2 三个厅的效率随时间变化图

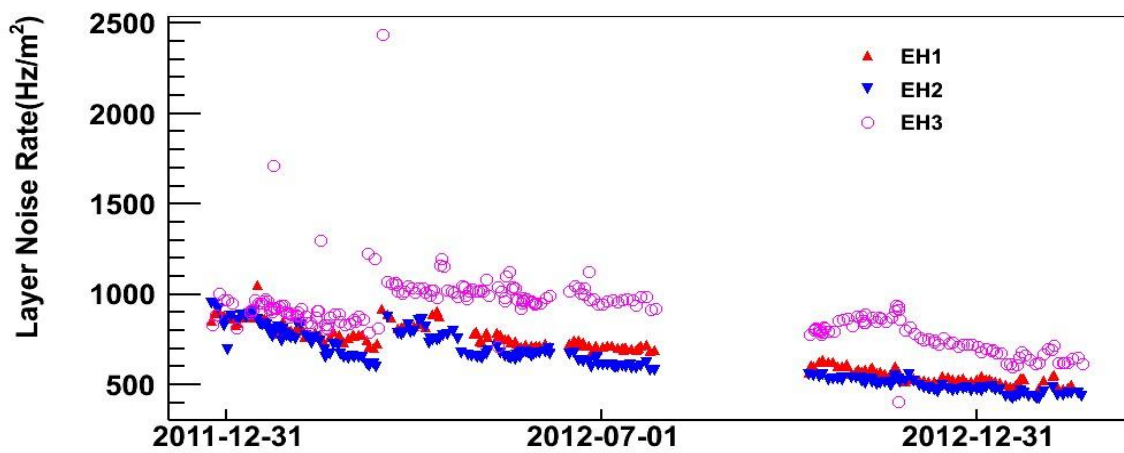


图 7.3 三个厅的噪声率随时间变化图

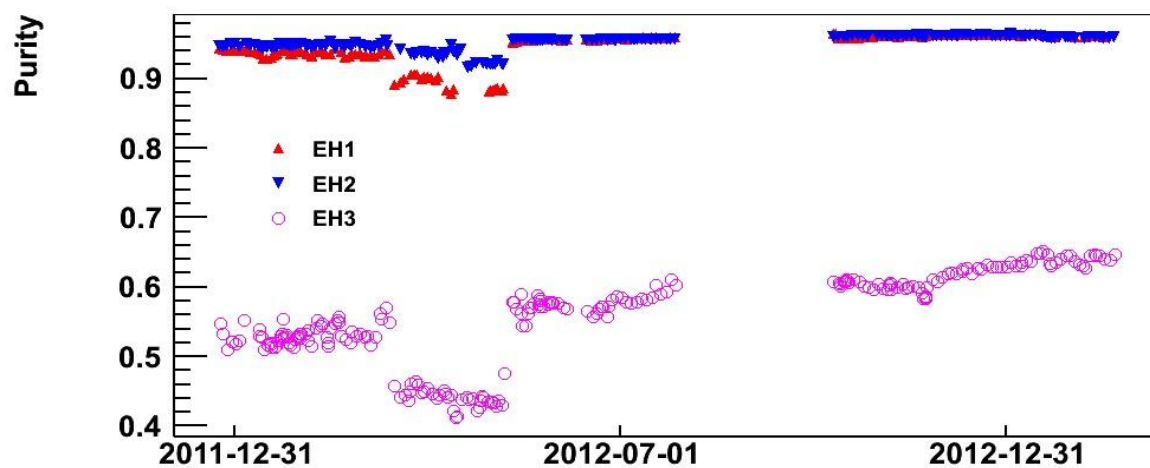


图 7.4 三个厅的纯度随时间变化图

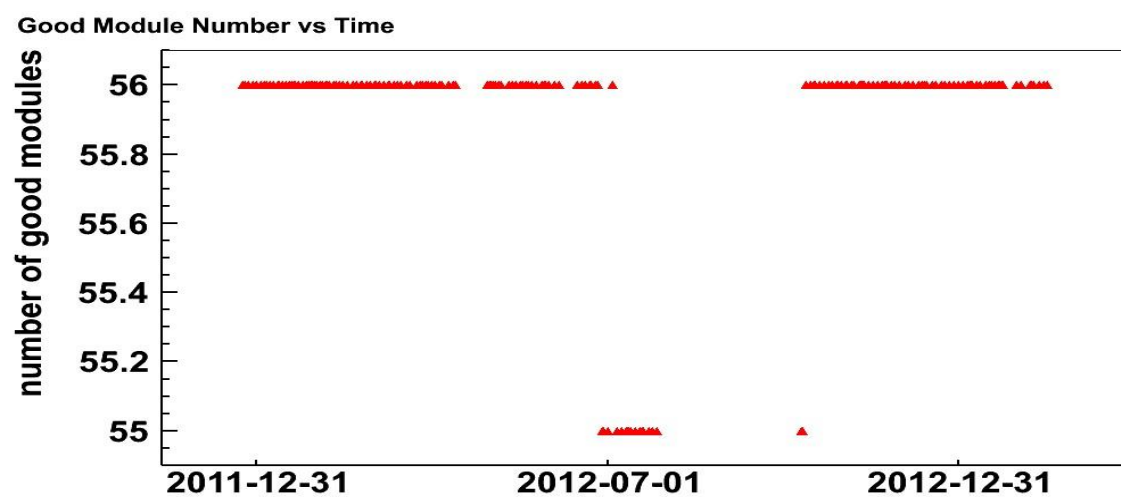


图 7.5 一号厅正常模块数随时间变化图

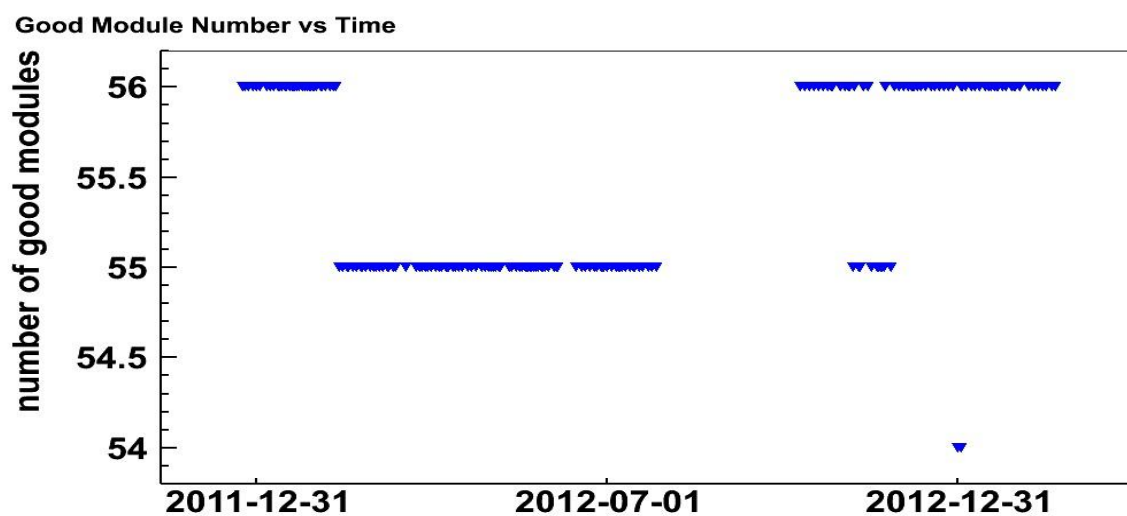


图 7.6 二号厅正常模块数随时间变化图

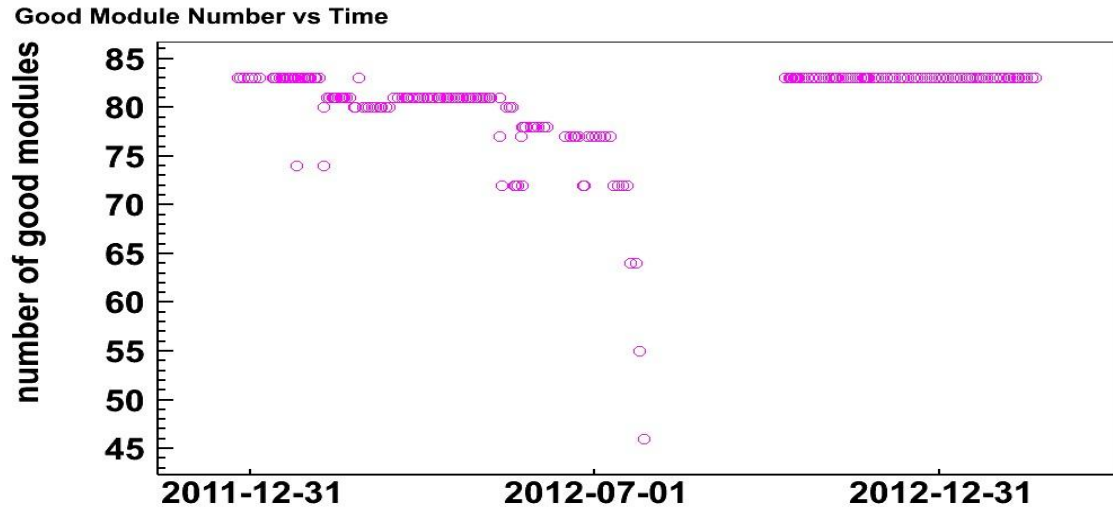


图 7.7 三号厅正常模块数随时间变化图

7.2 效率下降原因分析和相关测试

影响探测器性能的因素包括体电阻率、面电阻率和气隙的变化，下面将会从这个几方面入手寻找导致效率下降的真正原因。

7.2.1 电阻率测试

从二号厅的一个模块里随机抽取一块裸室，用马蹄形测试其面电阻率，得到 22 °C 下的面电阻率是 0.14 MΩ/□。要求在 20 °C 时阻性板表面的石墨面电阻率的正常范围是 0.4~1 MΩ/□。尽管略有降低，但是并没有数量级的变化。



图 7.8 面电阻率测试

由于现场缺少工具，阻性板体电阻率可以通过以下公式(3.3)来估算。选取位于第 9 列

和第 5 行的模块的第 3 层和第 4 层的 4 块裸室进行了体电阻率测试，其测试过程如下：

在往裸室里面鼓吹纯氩直到探测器更换了 5 个体积之后，高压从 6000V 开始逐步升到 1 万伏（期间认为氩气始终处于被击穿状态），记录此时的高压和暗电流值，对得到的曲线做线性拟合后，求出斜率，根据欧姆定律计算得到该温度下的体电阻率，再利用公式(3.2)换算出 20℃下的体电阻率。结果如表 7.1 所示。章节 3.3.1 提到要求在 20℃时阻性板的体电阻率的正常范围是 $0.5\sim 2.5\times 10^{12}\ \Omega\cdot\text{cm}$ 。从表 7.1 中可以看到体电阻率只是略有小变化而已，不足以导致探测效率大幅度下降。

表 7.1 电阻率测试结果

模块	层	型号	20℃的体电阻率 ($\Omega\cdot\text{cm}$)
C9R5	3	大	3.30×10^{12}
C9R5	3	小	2.06×10^{12}
C9R5	4	大	2.54×10^{12}
C9R5	4	小	8.54×10^{12}

7.2.2 裸室的解剖

在打开二号厅的阻性板之前，发现裸室变形较为严重，从图 7.9 左图可以看到最边缘处上翘的垂直距离在 2 cm 左右，如此大程度畸变势必导致内部的垫片脱胶开扣。将该裸室打开后，从图 7.9 右图可以看到裸室的某一角出现黄色油状物质，但是裸室内部的其它区域并无这类东西。

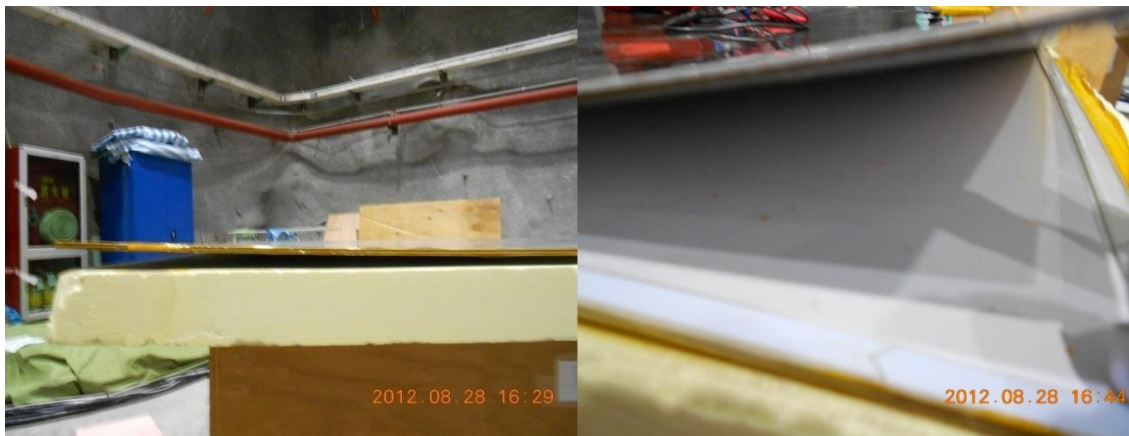


图 7.9 二号厅的阻性板的翘曲外观和内部形貌

7.2.3 高压扫描结果分析

测试过程中发现当抬起这些阻性板室时，裸室异常松软，仔细观察发现内部的垫片出现了开胶脱扣的痕迹，这就使得内部场强会因气隙变大引发下降，进而表现为效率下降。为此在分析高压扫描数据时，将各层的效率单独分析，从图 7.10 可以看到一号厅和二号厅的层效率大小之间存在顺序：第 1 层 > 第 2 层 > 第 3 层 > 第 4 层。但三号厅略微显得有些不同，这是由于三号厅的第 1 层的层噪声是第 2 和 3 层的 1.5 倍左右，而由于计算高压扫描得到的效率时无法使用水池信息，难以扣除偶然符合噪声对低估效率的较大影响，因此计算得到的三号厅的第 1 层层效率偏低。初步解释是由于第 1 层作为最底层，受到来自上方的压力最大，因此即使垫片开胶脱扣了，由于较大压力的存在使得气隙并没有变大，因此其效率最高。由于第 4 层作为最顶层，受到来自上方的压力最小，因此难以抵制垫片开胶脱扣的情况。

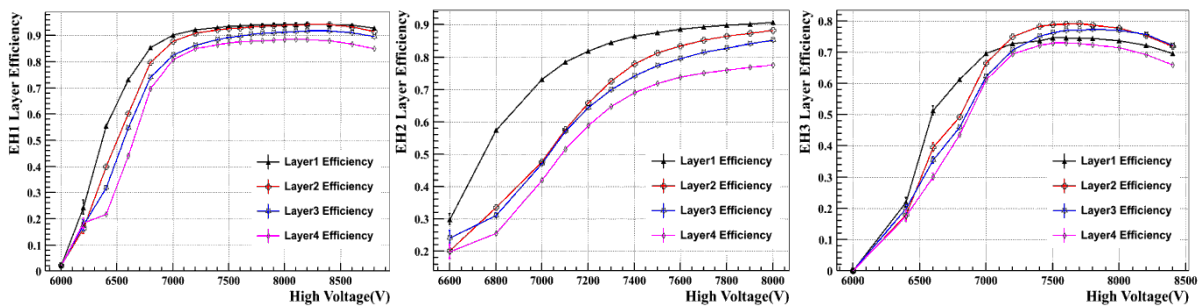


图 7.10 三个厅的各层效率随高压的扫描结果

为了进一步确认这种情况，对历次高压扫描结果做了比较，从图 7.11 可以看到从 2011 年底到 2012 年 9 月期间做了 3 次扫描，一号厅的第 1 层和第 2 层效率坪曲线略微出现左移，状态变得更好，但是第 3 层和第 4 层效率坪曲线基本没有移动。这说明一号厅的性能这一年来性能保持良好。图 7.12 可以看到噪声率这一年下降为原来的一半。但从图 7.13 可以看到，二号厅的 4 层效率坪曲线均出现右移，状态变差，尤其从 2011 年 12 月和 2012 年 3 月期间性能急剧下降，特别是第 4 层急剧恶化。这说明二号厅的性能这一年来性能下降严重。从图 7.14 可以看到二号厅的噪声率出现了下降。三号厅的情况和二号厅类似（因为高压扫描时阵列位于矮厅，无法使用 R2 挑选干净的 μ 子，所以得到的是被低估的层效率），也是层效率出现了下降。这说明三号厅的阻性板室探测器也出现了明显的脱胶开扣情形。

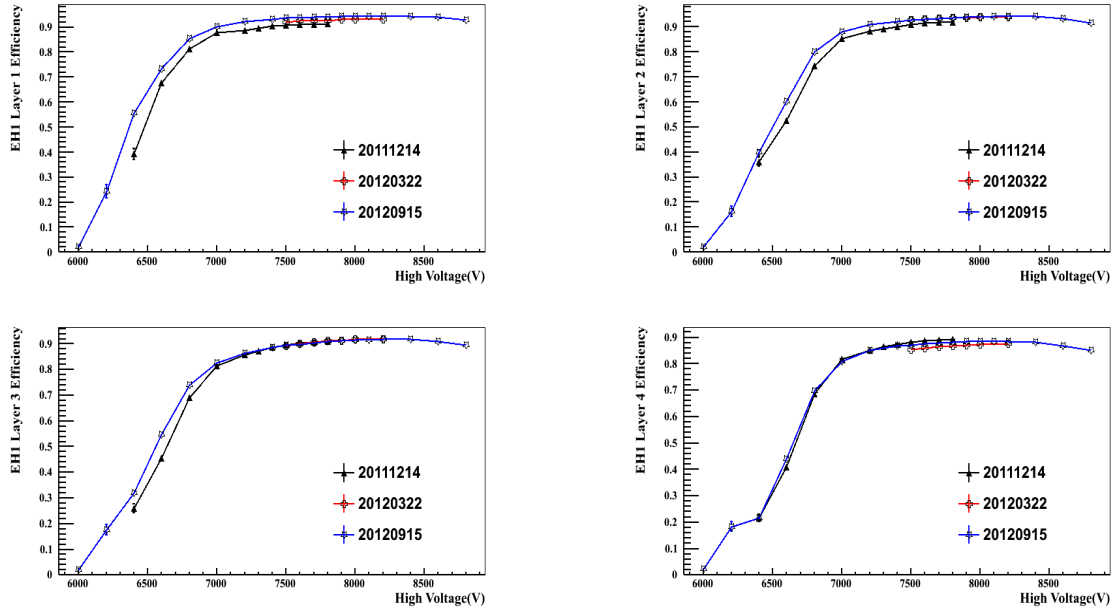


图 7.11 一号厅历次高压扫描的层效率比较

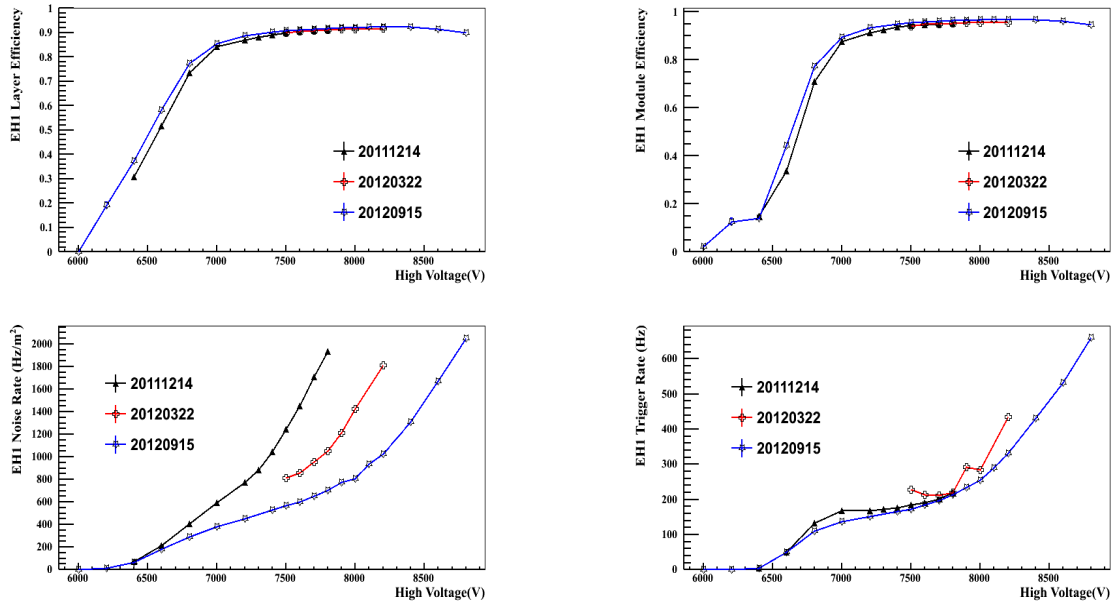


图 7.12 一号厅历次高压扫描的各项性能比较

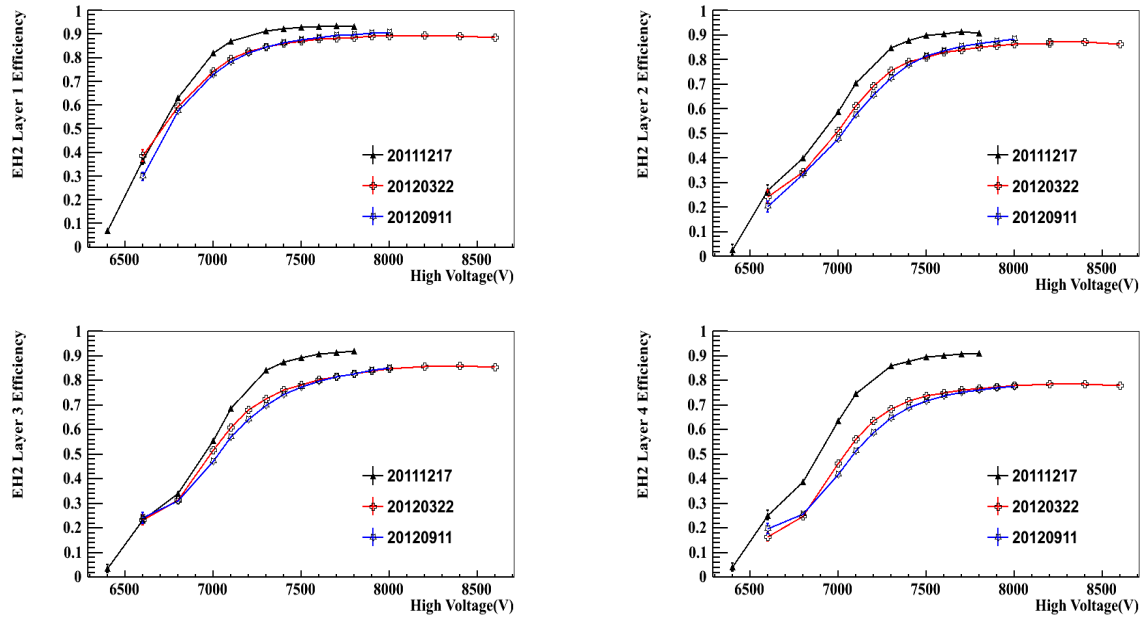


图 7.13 二号厅历次高压扫描的层效率比较

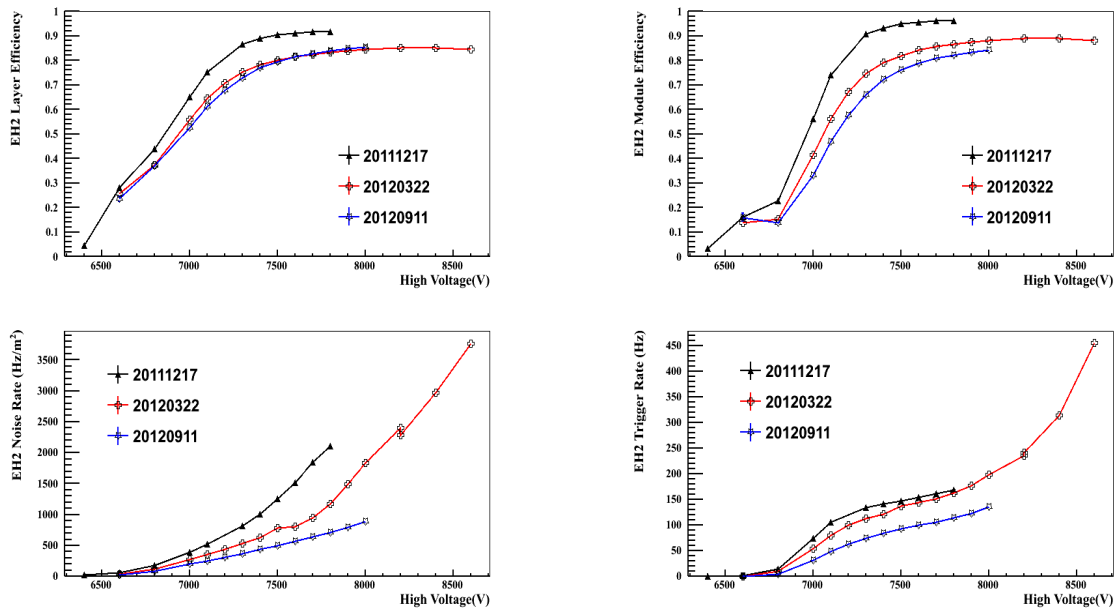


图 7.14 二号厅历次高压扫描的各项性能比较

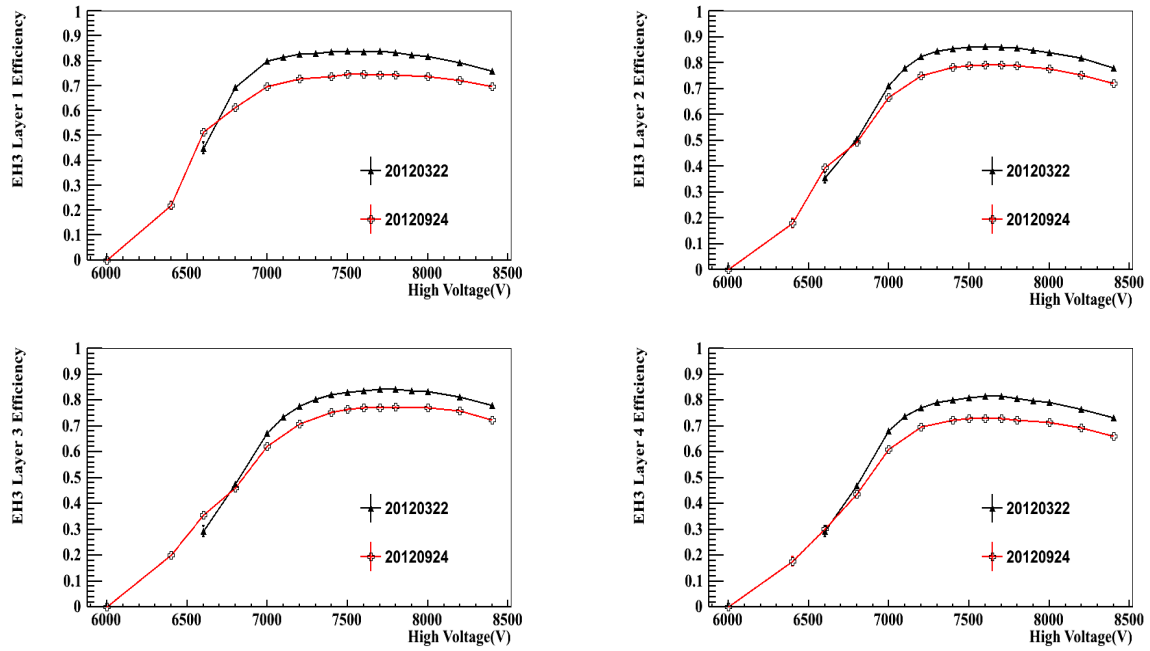


图 7.15 三号厅历次高压扫描的层效率比较

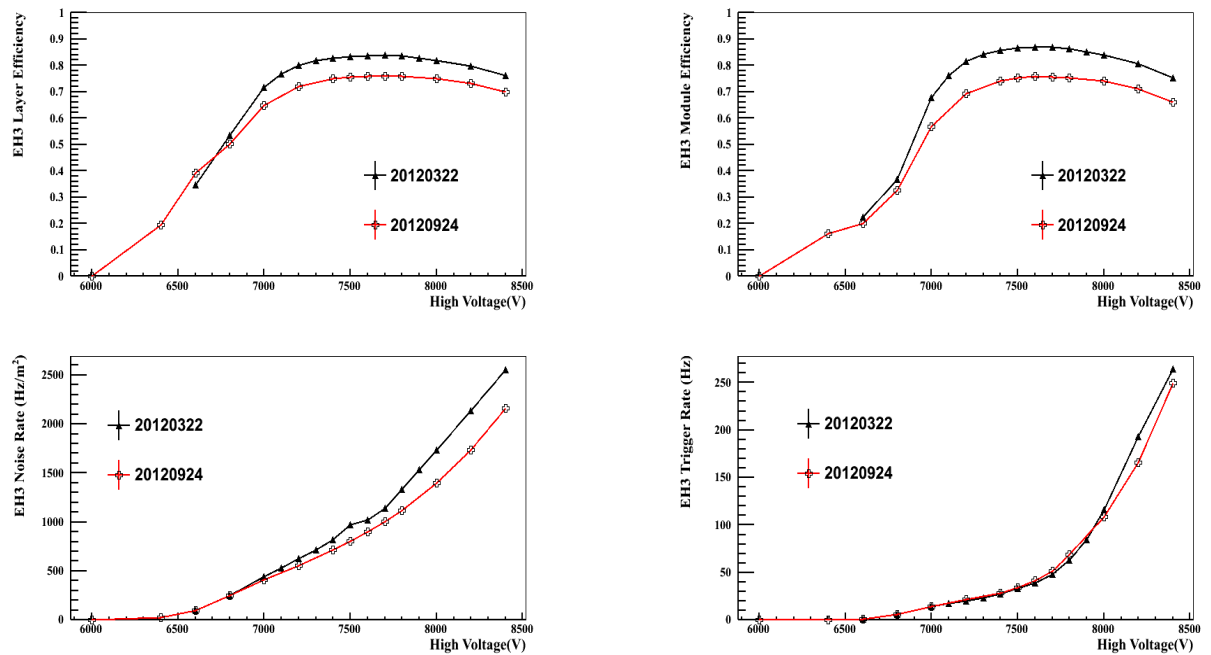


图 7.16 三号厅历次高压扫描的各项性能比较

7.2.4 解决办法

为了进一步验证以上猜想，利用弹簧钢板制作了一个 U 型夹，其形如图 7.17 的左上部分所示，可以看到其舒缓状态是该夹子呈现 U 型，通过图 7.17 右上部分的固定装置可以将 U 型夹的两端紧固，其情形如图 7.17 左下部分所示，如此会对模块存在向下的压力。

测试结论表明，效率没有得到明显改善，但是如果层效率较低的会出现好转。猜想由于 U 型夹自重为 10 kg 和因钢板变形产生的压力为 10 kg，因此总共对模块产生了 20 kg 的力，但对于改善模块的效率而言还不足够大。为了验证这一猜想采用了多个铁板堆叠来产生更大的压力，实物图见图 7.18。当超过 40 kg 的压力压在模块的两边时，效率得到了明显的改善，但是如果每个模块都覆盖如此多的铁架子，将会大大超过了支撑架的压力。因此这种方法只是作为一种检验的手段。另外由于之前频繁出现过流现象表明模块内部的绝缘性能有待提高，如果再加上这么高的压力，也许会导致绝缘膜受压变薄，如此很有可能使得探测器工作不稳定。为保险起见，仍保持现状运行。

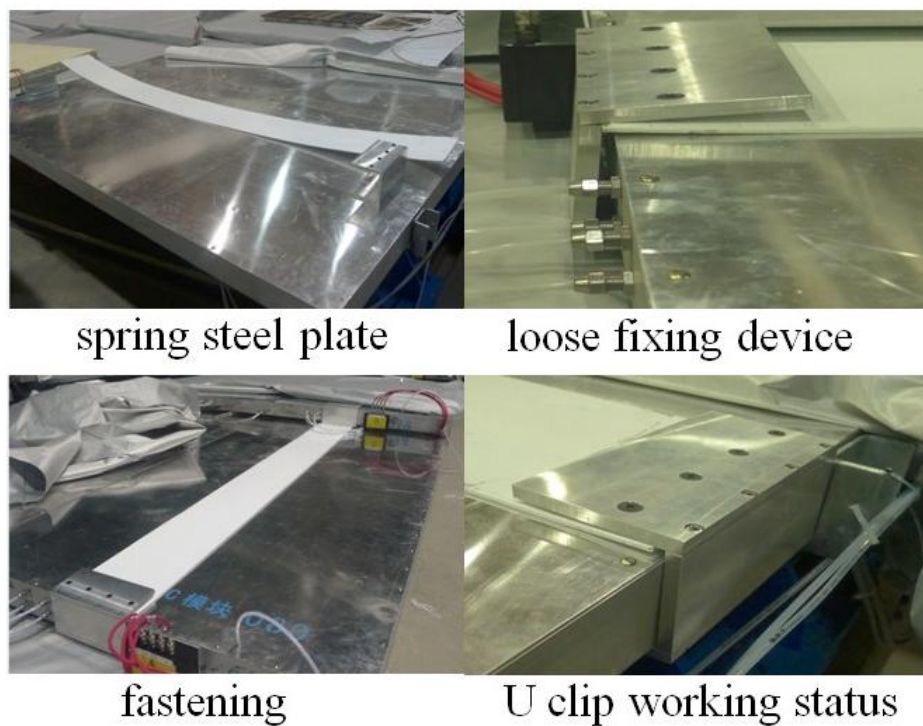


图 7.17 加压装置 U 型夹实物图



图 7.18 铁板加压测试实物图

7.3 改进阻性板室探测器的建议

前面提到，北京谱仪的阻性板室探测器的生产工艺和大亚湾的没有本质区别，但是为何没有出现这种垫片脱胶开扣导致效率下降的现象？这是由于阻性板室探测器的模块（厚度是 32 mm）是塞在轭铁的缝隙（厚度是 40 mm）里，并用 8 mm 厚的阳光板占满安装的缝隙。后来在试运行的过程中由于采用较细的气管导致尾气的气阻过大，进而导致阻性板室脱胶开扣。在往轭铁的缝隙塞入木条和减少出气口压力后，测试结果表明在一定程度上恢复低效率的工作区域。也正因为采用了塞木条的办法后，避免了阻性板室探测器在长期运行中逐渐显现的效率下降问题。但是大亚湾的模块是安装在支撑架上，无法采用塞木条或者加重物的办法来很好解决。因此如果大亚湾二期还需要使用阻性板室探测器，就需要在设计探测器时考虑添加加压装置。除此之外，还需要在裸室生产、模块结构、电子学等方面进行改进。

1) 裸室生产的改进

1.1) 进一步改进阻性板性能，从根源上提高阻性板的表面光洁度；

1.2) 对粘接用的环氧胶做进一步研究，选用粘接强度、耐破坏性、抗剪切性更好的粘胶。以前预研时发现 3M 生产的胶各方面的性能不错，最后出于成本的考虑，选用了抗剪切性能略差但价格只是 3M 胶的十分之一的国产 508 环氧胶；

1.3) 改进压合方式，更好地控制压力，使压力更加稳定、一致、均匀，同时使生产更加规范化，从而提高成品率；

1.4) 建造更好的清洁间，减少生产过程中的灰尘污染；

2) 模块结构的改进

2.1) 增加探测器层数，从而提高探测器的信噪比和整体效率，具体层数需要模型试验结果来决定；

2.2) 提高模块的刚性，例如用铝蜂窝板代替现在上下底的铝板；

2.3) 通过改变模块的结构解决串扰问题，采用更好的读出条，以及进一步研究是否需要改变读出条的形式；

3) 安装方面的改进

3.1) 在安装之前不能再让探测器受潮，需要一个存放场所；

3.2) 在实验厅环境湿度高的情况下，暂时不安装，等环境情况好了以后再安装；

3.3) 做好防水的工作，例如安装完探测器模块后立刻覆盖防水布；

4) 电子学方面的改进

4.1) 因一期采用了 Cross Trigger 方式，触发信号需要来回传，所以时间窗开得比较大，这样偶然符合计数率增加，因而总计数率增加太多，而其可以考虑不用 Cross Trigger，减小时间窗，这样不仅可以压低事例率，对探测器本身绝对效率计算将大有帮助；

4.2) 一期电缆太粗、太重，不少电子学问题例如读出收发器的电缆松动是由于这个原因引起的，二期可否考虑采用细一些的电缆，比如光纤；

5) 气体和高压方面的改进

5.1) 二期的地下深度远比一期的深，阻性板室的覆盖面积更大，因此气体使用量更大，无论从运行经费方面、安全方面、环保方面来说，都需要考虑气体的回收和再利用（欧洲的 CMS 上阻性板室探测器的工作气体是循环利用的）；

5.2) 试运行过程中，高压分配盒和高压盒均暴露不少问题，因此需要改善高压装置的绝缘性能，包括涂绝缘漆、使用塑料螺丝、以及进一步改善模块内部的绝缘等措施；

7.4 好的运行文件挑选

7.4.1 挑选的目标

由于在物理分析中需要使用阻性板室探测器的数据，但是由于探测器在运行过程中会发生诸如高压过流、断电、电子学板卡不工作和气体供应异常等各种事故，对于发生这种问题时，探测器的状态发生了改变，但是物理分析时需要用到稳定运行的探测器数据。因此需要再开发一个程序，目标是能够自动分析每次运行中各个数据文件（一个运行有多个数据文件）对应的探测器状态是否正常稳定。对于正常稳定运行时的数据文件编号，能将其放到以运行号命名（run number）的运行列表（good runlist）里面。

7.4.2 挑选的困难和对应的解决办法

首先遇到的困难是，如何判断这个数据文件对应的探测器状态是正常稳定运行的。反过来思考，探测器不稳定运行存在哪几种情况？前面提到有高压过流、断电、电子学板卡不工作和气体供应异常。

1) 高压过流：如果某一路高压过流，这使得同一层的 9 个模块（对于某些特殊道，比如望远镜阻性板室模块，有可能就是它自身一个模块，或者望远镜阻性板室模块和其它 9

个模块并联) 高压降为 0, 使得该层的计数率显著降低(理论上该层高压为 0 对应的计数率为 0, 但是由于存在串扰使得其并不为 0)。因此将本个文件的每个模块的 3/4 触发率和上一个文件的作比较, 如果变化幅度超过 30%, 并且异常的模块数超过 9 个, 则认定数据文件异常。

2) 高压系统异常: 有时会发生阻性板室高压机箱忽然不工作, 使得所有层的高压均不工作, 这就需把高压系统关闭之后所有的数据文件都去除(尽管阻性板室此时已不工作, 但是其它探测器还在正常运行取数, 因此新的数据文件还在不断产生)。

3) 电子学板卡不工作: 有时电子学板卡无法成功配置, 对应该次运行中这个模块的计数率始终为 0。对于这种情况, 一开始选择这次运行的所有数据文件都不使用, 但是由于这种电子学板卡异常的次数较多, 所以现在只好忽略这种情况。

4) 气体系统异常: 气体系统异常, 包括某一路气体供应不上或者整个系统不工作。由于气体系统和高压系统之间存在连锁, 如果气体系统出现异常在半小时内得不到解决, 高压系统将会自动关闭。这使得其解决办法和高压系统异常相同。

7.4.3 挑选的结果

从可以看到, 截止到 2012 年 7 月底, 阻性板室探测器正常运行的文件占总文件的比例中, 三号厅是最低的。这是由于阻性板制作后期, 考虑到工程进度的紧张, 挑选标准有所降低, 最后用于安装的阻性板室探测器性能不是特别好, 因此这一批阻性板室探测器在深圳的夏天到来之际, 频繁打火, 使得在 5、6 和 7 月份中三号厅的阻性板室探测器难以正常工作, 因此其比例较低。一号厅的比例较低的原因来自气体供应和气体系统不稳定工作。气体供应表现为有时因为某一路气体没有及时供应, 被迫关闭高压系统。另外还出现过由于气体间的温度异常急速变化, 气态异丁烷在质量流控制器内部产生积液, 而其它气体流量是以异丁烷的流量作为标准调节的 (ratio mode), 使得整个气体系统的气体流量均出现异常。除此之外, 由于大亚湾核电站的频繁断电, 对气体系统的电气部分造成损害, 也使得气体系统多次出现不工作情况。

表 7.2 阻性板室正常文件比例

位置	阻性板室正常的文件 总数	正常文件总数	比例
一号厅	26116	29009	90%
二号厅	15256	16299	93.6%
三号厅	10558	12821	82.3%

7.5 本章小结

本章分析了大亚湾实验三个厅包括效率、噪声率、触发率和纯度随时间的变化趋势，发现探测器性能持续下降，为了验证该结论的可靠性，测试了面电阻率和体电阻率、解剖裸室、采用分层分析高压扫描结果和加压验证等各种办法，最终确认了探测器效率下降的原因，是由于裸室的垫片脱胶开扣导致的。对于探测器未达到预期的性能，在裸室生产、模块结构、安装、电子学、气体和高压这五个方面提出了改进的建议。最后根据物理分析需求，生成了阻性板探测器的正常运行文件列表。

第八章 总结与展望

本论文的工作主要是围绕阻性板室探测器在大亚湾实验这种低计数率环境的应用展开的，依次介绍了阻性板室探测器的前期研究、宇宙线测试、探测器的安装及试运行、离线刻度和探测器的长期性能监测。

在阻性板室探测器的前期研究部分，主要介绍了探测器性能影响因素，如读出条、气体和模块构造等部分。

第二部分介绍了裸室和模块的宇宙线测试，它是作为保障未来探测器能否高性能可靠运行的重要环节。测试结果表明裸室的平均效率达到了 95% 以上，噪声率低于 1000 Hz/m^2 。最后简略介绍阻性板室探测器的质量控制数据库的设计和函数。

第三部分介绍了大亚湾现场探测器各个组成部分的安装、调试和试运行，并描述了出现的各种问题和对应的解决办法。

第四部分介绍了探测器的离线刻度各项性能指标的算法，并给出刻度结果。

第五部分介绍了探测器性能长期监测的结果，结果表明探测器的性能在逐渐下降。通过研究发现，裸室内部的垫片脱胶开扣是导致探测器性能下降的根本原因。并对阻性板室探测器的进一步改进提出建议。

大亚湾实验是继北京谱仪之后，高能所研发的阻性板室探测器的大规模应用，也是国际上首次将无油阻性板室探测器应用在低计数率环境，对于其应用在这种特殊的环境下的这种阻性板室探测器性能做了深入研究，给以后的同样类似的实验积累了宝贵的经验，使以后实验避免出现类似的问题。。

本论文可为需要了解阻性板室探测器在低计数率环境下的应用提供有意义的参考。本论文的缺陷是尽管发现和确认的预期目标没有实现，受限于各种条件制约，并没有能给出有效办法解决这个问题。希望以后的科研探索中，能找到更好的办法优化探测器性能。

参考文献

- [1] V. Shiltsev, MODERN PHYSICS LETTERS A 27 (2012).
- [2] LHC Study Group. The Large Hadron Collider: Conceptual Design Report.CERN/AC/95—05 LHC(1995)
- [3] BELLE Collaboration, Nucl. Inst. and Meth. A 598 (2009) 183-186.
- [4] BESIII 初步设计报告, 中国科学院高能物理研究所, 2003
- [5] Daya Bay Collaboration, Proposal of Daya Bay Experiment, 2007 [arxiv:hep-ex/0701029].
- [6] F. Ardellier et al. [Double Chooz Collaboration], arXiv:hep-ex/0606025.
- [7] RENO Collaboration, arXiv:1003.1391 [hep-ex].
- [8] Daya Bay Collaboration, Phys. Rev. Lett.108 (2012) 171803.
- [9] Daya Bay Collaboration, Chin. Phys. C 37 (1) (2013) 11001.
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg.
- [11] B. T. Cleveland et al. Astrophys. J., 496:505-526, 1998.
- [12] W. Hampel et al. [GALLEX Collaboration], Phys. Lett. B 447, 127 (1999).
- [13] J. N. Abdurashitov et al. [SAGE Collaboration], Phys. Rev. C 60, 055801 (1999).
- [14] K. S. Hirata et al. Phys. Rev., D44:2241-2260, 1991.
- [15] Y. Fukuda et al. Phys. Rev. Lett., 77:1683-1686, 1996.
- [16] Q. R. Ahmad et al. Phys. Rev. Lett., 87:071301, 2001.
- [17] Q. R. Ahmad et al. Phys. Rev. Lett., 89:011301, 2002.
- [18] Q. R. Ahmad et al. Phys. Rev. Lett., 89:011302, 2002.
- [19] Q. R. Ahmed et al. Phys. Rev. Lett., 92:181301, 2004.
- [20] B. Aharmim et al. Phys. Rev., C72:055502, 2005.
- [21] Y. Fukuda et al. [Super-Kamiokande Collaboration], Phys. Rev. Lett. 81, 1562 (1998)
- [22] M. Apollonio et al. [CHOOZ Collaboration], Eur. Phys. J. C 27, 331 (2003).
- [23] 温良剑, 大亚湾中心探测器反射波研制及事例重建研究, 中国科学院研究生院博士论文, 2010.
- [24] 王志民, 中微子探测器模型的研究, 中国科学院研究生院博士论文, 2009.
- [25] 路好奇, 大亚湾反符合水契伦科夫探测器及其模型的研究, 中国科学院研究生院博士论文, 2009.
- [26] 马烈华, 大亚湾中微子实验中的 RPC 探测器, 中国科学院研究生院博士论文, 2010.
- [27] 徐吉磊, 大亚湾 RPC 探测器性能及其对本底测量的研究, 中国科学院研究生院博

- 士论文, 2011.
- [28] Shaomin Chen, Zhe Wang, Daya, Quest for theta13 with Hydrogen Neutron Capture Signal, Daya Bay DocDB 7307-v6 (2012).
 - [29] Yifang, Wang, Seminar for the first physics results & standard slides, Daya Bay DocDB 7721-v4 (2012).
 - [30] R. Santonico, R. Cardarelli. Nucl. Instr. and Meth. A 187 (1981) 377-380.
 - [31] F. Anulli, et al., Nucl. Inst. and Meth. A 515 (2003) 322-327.
 - [32] BELLE Collaboration, Nucl. Inst. and Meth. A 598 (2009) 183-186.
 - [33] ALICE collaboration, Nucl. Inst. and Meth. A 661 (2012) 45-49.
 - [34] ATLAS Muon Collaboration, Nucl. Inst. and Meth. A 661 (2012) 6-9.
 - [35] G. Roselli, et al., Nucl. Inst. and Meth. A 602 (2009) 696-699.
 - [36] J. Zhang, et al., HEP & NP 27 (7) (2003) 615-618.
 - [37] J. Zhang, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 540 (2005) 102-112.
 - [38] J. Han, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 577 (2007) 552-557.
 - [39] J. Zhang, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 580 (2007) 1250-1256.
 - [40] Y. Xie, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 599 (2009) 20-27.
 - [41] J. Zhang, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 614 (2010) 196-205.
 - [42] S. Qian, et al., Chin. Phys. C (HEP & NP) 33(9) (2009) 769-773.
 - [43] Q. Zhang, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 654 (2011) 300-307.
 - [44] Q. Zhang, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 583 (2007) 278-284.
 - [45] M. Guan, et al., Muon simulation at the Daya Bay site,
<http://escholarship.org/uc/item/6jm8g76d>
 - [46] L. Ma, et al., Chin. Phys. C (HEP & NP) 34 (8) (2010) 1116-1121.
 - [47] L. Ma, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 659 (2011) 154-160.
 - [48] J. Xu, et al., Chin. Phys. C (HEP & NP) 35 (9) (2011) 844-850.
 - [49] 钱森, RPC 探测器研究和 BESIII MUC 气体比分监测, 中国科学院研究生院博士论文, 2009.
 - [50] 谢宇广, BESIII μ 探测器的研制与离线刻度, 中国科学院研究生院博士论文, 2007.
 - [51] Changguo Lu, Nucl. Instr. and Meth. A.602 (2009) 761-765.
 - [52] M. Abbrescia et al. Nucl. Instr. and Meth. A, 359 (1995) 603-609.
 - [53] F. Anulli, et al., Nucl. Instr. and Meth. A.602 (2009) 761-765.
 - [54] P. Camarri, et. al., Nucl. Instr. and Meth. A. 414(1998) 317.
 - [55] W. Riegler, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 481 (2002) 130
 - [56] 关梦云等, 高能物理与核物理, 28 (11) 2004 1176-1179
 - [57] 吕新宇, 二维 X 射线探测器(GEM)研制及性能研究, 中国科学院研究生院博士论

- 文, 2012.
- [58] Garfagnini, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 572 (2007) 177.
- [59] L.Barrera, et al., Study of a new Zig-Zag strip, Daya Bay DocDB 1484-v1(2007).
- [60] Guan Mengyun, et al., RPC chamber test, Daya Bay DocDB 1257-v3 (2007).
- [61] Eric Bogatin, 信号完整性分析, 2004
- [62] P. Fonte, V. Peskov, and B. D. Ramsey. (1997, Fall) Streamers in MSGC's and other gaseous detectors. ICFA Instrum. Bull. [Online].
<http://www.slac.stanford.edu/pubs/icfa>. vol. 15
- [63] H.R. Band, et al, Nucl. Instr. and Meth, A 594 (2008) 33
- [64] Lu Changguo, RPC gas flammability, Daya Bay DocDB 1705-v1 (2007)
- [65] 韩纪峰, BESIII μ 宇宙线测试和雪崩模式阻性板探测器研制, 中国科学院研究生院博士论文, 2008.
- [66] <http://www.mysql.com/>
- [67] [http:// www.php.net](http://www.php.net)
- [68] [http:// www.apache.org](http://www.apache.org)
- [69] Guan Mengyun, et al., Moving the RPCs along the rails Daya Bay DocDB 6460-v6(2011).
- [70] H. Hao, et al., Development of VME system in RPC electronics for Daya Bay Reactor Neutrino Experiment, Nuclear Science and Techniques (Accepted, in press).
- [71] 郝慧峰, 大亚湾反应堆中微子实验中基于 VME 的 RPC 电子学的研制, 中国科技大学博士论文, 2012.
- [72] <http://dayabay.bnl.gov/dox/LafKernel/html/annotated.html>
- [73] <http://cern.ch/gaudi/>
- [74] 张晓梅等, 高能物理与核物理, 2005 年 12 期
- [75] <http://geant4.cern.ch/>
- [76] <http://hyry.dip.jp:8000/pydoc/index.html>
- [77] Zheng Lei, Daya Bay DocDB 7289-v1 (2011)

发表文章

- [1] Z.Ning, et al., 2013 JINST 8 T03007.
- [2] S.Qian, et al., 2012 JINST 7 P02013.
- [3] L. Ma, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 659 (2011) 154 - 160.
- [4] Q. Zhang, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 654 (2011) 300 - 307.
- [5] Y. Wang, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 640 (2011) 85 - 90.
- [6] L. Ma, et al., Chin. Phys. C (HEP & NP) 34 (8) (2010) 1116 - 1121.
- [7] Z. Fu, et al., Chin. Phys. C (HEP & NP) 35(10) (2011) 946 - 951.
- [8] Z. Fu, et al., Chin. Phys. C (HEP & NP) 35 (12) (2011) 1134 - 1138.
- [9] Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay, F.P.An et al, [dayabay collabration] Phys. Rev. Lett. 108, 171803 (2012).
- [10] A side-by-side comparison of Daya Bay antineutrino detectors, F.P.An et al, [dayabay collabration], Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2012.
- [11] 宁哲等, 核技术, 33 (10) (2010) 740 - 744.
- [12] 付在伟等, 核技术, 34 (3) (2011) 227 - 231.

附录 1

本程序是一个运行于 ROOT 的 python 脚本文件，用于基于文献[26]和[56]给出的公式，计算出不同的有效介电常数对应的读出条阻抗。基于 ROOT 的 python 环境配置具体如下：

```
setenv ROOTSYS /afs/ihep.ac.cn/soft/dayabay/NuWa-64/opt/external/ROOT/5.26.00e_python2.7/x86_64-slc5-gcc41-opt/root
setenv PATH /afs/ihep.ac.cn/soft/dayabay/NuWa-64/env/NuWa-trunk/${ROOTSYS}/bin:${PATH}
setenv LD_LIBRARY_PATH
${ROOTSYS}/lib:/afs/ihep.ac.cn/soft/dayabay/NuWa-64/opt/external/Python/2.7/x86_64-slc5-gcc41-opt/lib:${LD_LIBRARY_P
ATH}
setenv PYTHONPATH ${PYTHONPATH}:${ROOTSYS}/lib
```

运行该程序之前 source 环境，然后 python -i *.py 即可（运行效果类似 root -l *.c）。如果需要实现批处理模式（即运行完自动退出），可使用 ./*.py, 效果和 root -b *.c 类似。最后在 Linux/BSD shell 按 Ctrl-d 退出提示符。如果是在 Windows 命令行中，则按 Ctrl-z 再按 Enter。

```
#!/afs/ihep.ac.cn/soft/dayabay/NuWa-64/opt/NuWa-trunk/./external/Python/2.7/x86_64-slc5-gcc41-opt/bin/python
import os, sys, time, string
from ROOT import TGraph, TCanvas, TObject
import math
from array import array

def main():
    height_list = [0.035E-3]
    Dieletric = 4
    width = 0.065
    pi = 3.14
    impendence = []
    dieletric_list = []
    for height in height_list:
        for i in range(1,900):
            Dieletric = 1 + 0.01 * i
            Corrected_Dieletric = 0.5*(Dieletric + 1) + 0.5*(Dieletric - 1)*math.pow((1 + 12 * height/width),-0.5)
            impendence.append(120*pi/(math.sqrt(Corrected_Dieletric)*(width/height + 1.393 + 0.667*math.log(1.44 +
```

```
width/height))))  
  
        dielectric_list.append(Dielectric)  
  
    print dielectric_list  
  
    graph1 = TGraph(len(dielectric_list), array('f', dielectric_list), array('f', impedance))  
  
    c4 = TCanvas("c4", "Impendence", 900, 600)  
  
    c4.cd()  
  
    graph1.SetTitle("")  
  
    graph1.Draw("AP")  
  
    graph1.GetYaxis().SetTitle("Strip Impendence (#Omega)");  
  
    graph1.GetXaxis().SetTitle("Dielectric");  
  
    c4.SaveAs("1.png")  
  
main()
```

致 谢

首先谨以最真诚的敬意，感谢我的导师张家文研究员多年来对我无私的指教。这四年来张老师从工作到生活，一直给予我热忱的指导和帮助，使我从一个懵懂青年成长为一个对粒子物理略知一二的博士。张老师干活身先士卒的精神和不拘一格的解决问题方式，使我思维开阔，受益匪浅，深受启发。每次到办公室和张老师讨论学术问题，收获总是满载而归。同时很感谢张老师能给予我宽松的科研环境，让我有机会做任何我感兴趣的课题。我为有这么一位好导师而深感荣幸。也感谢初晓梅老师对我生活和学习上无微不至的关心和照顾。

感谢高能所的杨长根研究员、曹俊研究员和李小男研究员的宝贵指点，同时感谢普林斯顿大学的陆昌国老师。

感谢 muon 组的钱森师兄、马烈华师兄、张清民师兄和谢宇广师兄对我工作上的指导和帮助。

感谢大亚湾组的徐吉磊、何苗、邹佳恒、关梦云、赵洁、于泽源、陈晓辉、路浩奇、王志民、季晓璐、温良剑、刘金昌、张一纯、张书华、索伦、李晓波、安丰鹏、夏冬梅、章飞虹、陈晓苏、占亮、钟玮丽、王玲玉、赵庆旺、刘颖彪等同事在工作中的帮助和支持，尤其要感谢徐吉磊、何苗和邹佳恒这几位师兄在数据分析方面给予的大力和无私的帮助，使我能够茁壮成长。感谢韩玲老师对我的帮助，无论在工作上还是生活上，都令我感受到温暖。

感谢探测器一组的田立朝、范胜男、修清磊、刘梅、刘义、鞠旭东、张余练以及以及毕业的吕新宇、樊瑞睿、徐品、刘贲、韩晨霞、赵中亮、王小胡和董静等同事，让我非常眷恋这四年的学习和生活。

感谢篮球队的各位兄弟，特别是蒋文奇、朱程和王小龙这几位师兄，很怀念四年来和篮球队兄弟们一起在球场上奔跑的日子。

感谢周晓康、徐明、秦小帅和赵光等诸位好友对我的帮助。

最后感谢我的父母和未婚妻长期的关心和支持。

宁 哲

2013 年 4 月 1 日

