分类号_____ 密级_____

UDC_____ 编号_____

中国科学院研究生院
博士学位论文

大亚湾中微子实验中的 RPC 探测器

马烈华

指导教师 王贻芳 研究员 中国科学院高能物理研究所

申请学位级别 博 士 学科专业名称 粒子物理与原子核物理

论文提交日期 2010 年 4 月 20 日 论文答辩日期 2010 年 5 月 25 日

培养单位 中国科学院高能物理研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 李卫国

The RPC detector of Daya Bay antineutrino experiment

Ma Liehua

A dissertation submitted to
Institute of High Energy Physics,
Chinese Academy of Sciences for the degree of Doctor of Philosophy

Supervisor: **Prof. Wang Yifang**

April, 2010

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

大亚湾反应堆中微子实验的物理目标是探测中微子混合矩阵中的最后一个未知参数$\sin^2 2\theta_{13}$，并在90%的置信水平上使灵敏度达到0.01或更好。大亚湾实验的主要本底是来自宇宙线μ子。尽管地下实验室可以屏蔽大部分μ子，剩余本底的扣除仍然是至关重要的。大亚湾利用了阻性板探测器（RPC）和水契伦柯夫探测器两者联合来排除本底。

RPC自从20世纪80年代被发明以来，就以其探测效率高、结构简单、造价低廉、易于大面积应用等特点，在粒子物理和天体宇宙线物理上得到了广泛的应用。高能所以及高能科迪公司联合开发的无油工艺阻性板RPC在BESIII上已经有了成功的应用经验，又将应用到大亚湾实验中去。大亚湾RPC的前期研究主要是对RPC读出条信号的研究和模块的设计。通过实验验证了长读出条对RPC信号读出的可行性，最终将“Z”型读出条应用于RPC模块中。在高能所和高能科迪公司的努力下，大亚湾RPC的批量生产已经完成了大部。本文介绍了RPC的生产工艺以及各个质量控制的关键环节。宇宙线测试是RPC质量认证的最主要环节。测试的结果表明，RPC的平均效率达到了95%以上。扣除不合格的RPC后，应用于大亚湾的RPC平均效率预计可达96%。为了保存和有效地管理RPC批量生产和宇宙线测试中的数据，专门设计了RPC质量控制数据库，用来及时了解生产和测试情况，同时也为数据的分析提供了极大地方便。为了更好地发挥RPC的性能，还对RPC的工作气体进行了研究，定量给出了气体与性能的关系。结果还表明在工作气体中加入少量的SF_6能够在保证RPC效率的同时降低噪声和暗电流，同时也能得到较大的工作高压范围。最后针对将来运行时RPC可能出现的故障，通过模拟的方式，研究了各种故障情况下对RPC系统整体效率的影响。

关键词： 大亚湾中微子实验 RPC探测器 质量控制 宇宙线测试 气体研究 数据库

Abstract

The Daya Bay reactor neutrino experiment is designed to determine the last unknown neutrino mixing angle, θ_{13}, with a sensitivity of $\sin^2 2\theta_{13}<0.01$ at a 90% confidence level. The main backgrounds at Daya Bay are caused by cosmic-ray muons, which will be suppressed significantly by locating the detectors underground. Though the background at Daya Bay will be relatively low, highly-efficient muon rejection is vital. RPCs will be used to actively suppress backgrounds in conjunction with the water Cherenkov detector.

RPC was firstly developed in the early 1980s. Due to its high efficiency, simple structure and low cost, it is well-suited for large-area detectors. Accordingly RPCs have been an important component in many particle and cosmic ray physics experiments. A new type RPC without linseed-oil developed by IHEP and Gaonengkedi Company has been successfully used in BESIII experiment, and will also be used in Daya Bay. The first focus of Daya Bay RPC study is the special readout strip and module structure. The feasibility of long strips has been verified through dedicated studies. Finally,a 'Zig-Zag' type readout has been chosen and used in RPC modules. The mass production of Daya Bay has been almost completed under the big effort of IHEP and Gaonengkedi Company. The manufacturing technique and main quality control (QC) process are also presented in this thesis. Cosmic ray test is the important method for the quality assurance (QA) of RPCs. The test shows the average efficiency of all the produced RPCs is above 95%. By rejecting the ones failed, RPCs have an average efficiency of about 96% will be used in Daya Bay. A QC database is set up to save and manage the data from QC and cosmic ray test. It provides a big convenience for data analyzing. In order to optimize the RPC performance, studies on gas mixtures have been also performed. Some quantitative results between gas and performance are reported. It is also found that adding a small amount of SF_6 in gas mixtures can give an equivalent efficiency, reduce the noise rate and dark current, and extend the range of operating voltage. At last, some simulation results are presented to study the influence on the efficiency of the RPC system under the situations of various inefficient components.

Keywords:

Daya Bay neutrino experiment, RPC, quality control, cosmic ray test, gas mixture, database.

目　　录

声　明 ..... **v**

关于学位论文使用授权的说明 ..... **v**

摘　　要 ..... **i**

Abstract ..... **iii**

目　　录 ..... **v**

插 图 目 录 ..... **ix**

表 格 目 录 ..... **xiii**

第一章 引言 **1**

1.1 粒子物理与粒子物理实验 1

1.2 粒子探测器 1

1.3 论文主要内容和结构 2

第二章 大亚湾中微子实验 **3**

2.1 实验目标和意义 3

2.2 大亚湾实验总体规划 5

2.2.1 实验总体设计方案 5

2.2.2 实验布局和基线选取 6

2.3 探测器 7

2.3.1 反中微子探测器 8

2.3.2 反符合探测器 9

2.4 实验误差和预期结果 11

第三章 RPC 探测器的研制与前期研究 **13**

3.1 RPC 探测器 13

3.1.1 RPC 的工作原理 13

3.1.2 阻性板材料 15

3.1.3 RPC 的性能指标及其影响因素 16

3.2 大亚湾中的 RPC 探测器 21

3.2.1 信号读出条研究 22

3.2.2 工作气体预研 27

3.2.3 RPC 模块 28

3.2.4 模块电子学系统 31

3.3 本章小结 34

第四章 RPC 的制作工艺和质量控制 **35**

4.1 阻性板 35

4.1.1 加工生产 35

4.1.2 体电阻率测试 35

4.1.3 裁切 39

4.1.4 表面处理与面电阻率测试 39

4.2 RPC 裸室制作与检漏 42
4.3 高压插针的制作 42
4.4 Training 44
4.4.1 Training 时间 45
4.4.2 Training 效果 47
4.4.3 体电阻率估算 48
4.5 本章小结 50
第五章 大亚湾 RPC 的宇宙线测试 53
5.1 测试系统与设置 53
5.1.1 气体系统 53
5.1.2 信号读出 54
5.1.3 Trigger 系统 55
5.1.4 电子学系统 56
5.1.5 数据获取 57
5.2 测试流程与进度 58
5.3 测试结果 59
5.3.1 工作高压的合理范围与最佳值 59
5.3.2 效率 61
5.3.3 单计数率 68
5.3.4 暗电流 70
5.3.5 生产日期与性能 74
5.4 RPC 模块测试 76
5.4.1 测试系统 77
5.4.2 初步测试结果[40] 77
5.5 本章小结 79
第六章 RPC 工作气体的研究 81
6.1 简介 81
6.2 Isobutane 82
6.3 Ar 与工作高压 84
6.4 六氟化硫（SF_6） 87
6.4.1 不同 SF_6 比份的气体 87
6.4.2 固定 0.5% SF_6 的气体 90
6.5 本章小结 93
第七章 大亚湾 RPC 质量控制数据库 95
7.1 数据库简介 95
7.1.1 基本结构 95
7.1.2 分类 96
7.1.3 查询语言 96
7.2 数据库软件 97
7.2.1 MySQL 体系结构 97

7.2.2 MySQL 索引 98
7.2.3 Apache 与 PHP 99
7.2.4 数据库安装与配置 99
7.3 RPC 数据库设计 100
7.3.1 Bakelite 100
7.3.2 RPC 101
7.3.3 Module 102
7.4 RPC 数据库功能 102
7.4.1 查询与显示功能 103
7.4.2 统计功能 105
7.4.3 数据采集功能 108
7.4.4 权限管理功能 109
7.4.5 其他管理功能 109
7.5 本章小结 109
第八章 RPC 系统效率的模拟 111
8.1 Geant4 和 G4dyb 简介 111
8.1.1 Geant4 111
8.1.2 G4dyb 113
8.2 μ 子产生子 113
8.3 位置与几何 115
8.4 系统效率模拟 116
8.4.1 模块故障 117
8.4.2 探测层故障 118
8.4.3 RPC 裸室故障 120
8.4.4 读出道故障 121
8.4.5 RPC 效率偏移 122
8.5 RPC 效率下降的影响 123
8.5.1 **I** 类中子 124
8.5.2 **II** 类中子 126
8.5.3 小结 127
8.6 本章小结 128
第九章 总结与展望 131
参 考 文 献 133
发 表 文 章 135

插 图 目 录

图 2.1 目前国际上对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的实验测量 5
图 2.2 振荡几率与基线长度的关系 7
图 2.3 大亚湾实验布局。近远点探测器和反应堆的相对位置 7
图 2.4 大亚湾探测器远点实验厅示意图 8
图 2.5 反中微子探测器剖面图 9
图 2.6 远点探测器的结构图（俯视） 10
图 2.7 大亚湾实验与 Chooz 的预期灵敏度 12
图 3.1 RPC 中的雪崩放大倍增 14
图 3.2 BESIII 阻性板和 BaBar 阻性板表面比较 16
图 3.3 不同温度气压条件下 RPC 效率随高压的变化 18
图 3.4 效率曲线随 p/T 的偏移关系 18
图 3.5 RPC 效率随甄别阈的变化（工作高压固定） 19
图 3.6 不同温度气压条件下单计数率和暗电流随高压的变化 20
图 3.7 RPC 单计数率随甄别阈的变化（工作高压固定） 20
图 3.8 RPC 模块摆放示意 22
图 3.9 不同宽度的 2m 长读出条信号余辉图 24
图 3.10 不同宽度的 2m 读出条的信号幅度比较 24
图 3.11 不同宽度的 6m 长读出条信号余辉图 25
图 3.12 不同宽度的 6m 读出条的信号幅度比较 25
图 3.13 “Z”型读出条示意图 26
图 3.14“Z”型读出条的 RPC 信号 26
图 3.15 异丁烷为 4%的混合气体与 BESIII 气体下 RPC 的效率曲线 27
图 3.16 异丁烷为 4%的混合气体与 BESIII 气体下 RPC 的单计数率曲线 28
图 3.17 RPC 模块内部结构示意图（横截面） 29
图 3.18 模块内部各层 RPC 的摆放 30
图 3.19 RPC 模块内部单层 RPC 气管及高压的走线示意图 30
图 3.20 RPC 模块电子学结构示意图 32
图 3.21 FEC 的结构图 33
图 3.22 ROT 结构图 33
图 3.23 ROM 数据处理流程图 34
图 4.1 阻性板体电阻率测试机 36
图 4.2 阻性板体电阻率测试示意图 36
图 4.3 阻性板体电阻率随温度的变化 37
图 4.4 阻性板 20℃平均体电阻率的统计分布 38
图 4.6 阻性板裁切机 39
图 4.7 典型的喷漆枪 40
图 4.8 面电阻率测量设备 40
图 4.9 阻性板面平均电阻率的统计分布 41
图 4.10 正在覆膜的阻性板 41
图 4.11RPC 的高压插针与针头 43
图 4.12 制作好的 RPC 高压头 44
图 4.13 利用超级终端控制并显示 SY127 高压及电流信息 45

图 4. 14 RPC 在 training 时电流随时间的变化. 46
图 4. 15 RPC Training 操作的时长分布图。一般每次同时 training 8 块 RPC. 46
图 4. 16 二次 training 前后 RPC 效率曲线的比较 47
图 4. 17 二次 training 前后 RPC 单计数率曲线的比较 48
图 4. 18 二次 training 前后 RPC 暗电流曲线的比较 48
图 4. 19 根据 training 估算的体电阻率与实测值之差值的分布图 49
图 4. 20 Training 条件下，RPC 电流随高压的变化. 50
图 4. 21 阻性板体电阻率与温度的变化关系. 50
图 5. 1. RPC 探测器的宇宙线测试系统示意图 53
图 5. 2 KMS 公司的气体质量流控制器 54
图 5. 3 RPC 探测器的读出条示意图(a)以及实物图(b) 55
图 5. 4 Trigger 系统。三块塑料闪烁体探测器作为 Trigger 望远镜. 56
图 5. 5 RPC 探测器宇宙线测试系统电子学逻辑示意图 57
图 5. 6 标准环境（T=293K，P=1010 mbar）下的 RPC 的效率曲线 60
图 5. 7 标准环境（T=293K，P=1010 mbar）下的 RPC 的单计数率曲线. . . . 60
图 5. 8 标准环境（T=293K，P=1010 mbar）下的 RPC 的暗电流曲线. 61
图 5. 9 测试环境下 RPC 在 8000 V 高压时的效率统计分布 62
图 5. 10 标准环境下 RPC 在 8000V 高压时的效率统计分布 63
图 5. 11 RPC 最高效率的统计分布 63
图 5. 12 RPC 效率达到最高时的高压分布 64
图 5. 13 RPC 效率曲线的几个标志点定义 65
图 5. 14 效率达到 50%的高压值 V_{50} 的分布 65
图 5. 15 效率曲线达到转折点的高压值 V_{knee} 的分布 66
图 5. 16 效率达到 95%的高压值 V_{95} 的分布 66
图 5. 17 效率与阻性板平均体电阻率散点图. 67
图 5. 18 测试环境下 RPC 8000 V 高压时的单计数率统计分布 68
图 5. 19 标准环境下 RPC 在 8000 V 高压时的单计数率统计分布 69
图 5. 20 单计数率和阻性板平均体电阻率的散点图. 69
图 5. 21 体电阻率与单计数率及其 RMS 的关系 70
图 5. 22 测试环境下 RPC 8000 V 高压时的单计数率统计分布 71
图 5. 23 标准环境下 RPC 在 8000 V 高压时的单计数率统计分布 71
图 5. 24 暗电流和阻性板平均体电阻率的散点图 72
图 5. 25 体电阻率与单计数率及其 RMS 的关系 73
图 5. 26 RPC 的暗电流与单计数率 73
图 5. 27 RPC 暗电流除以单计数率的值的分布（8000 V） 74
图 5. 28 各个生产月份的 RPC 平均效率 75
图 5. 29 各个生产月份的 RPC 平均单计数率和暗电流 76
图 5. 30 各个生产月份使用的阻性板平均体电阻率 76
图 5. 31 RPC 模块测试系统 77
图 5. 32 某个模块的 64 个小块效率 78
图 5. 33 RPC 模块效率统计 78
图 5. 34 RPC 模块小块区域统计 78
图 6. 1 Ar 固定为 65%，Isobutane 从 1%改变到 6%时的效率曲线. 83
图 6. 2Ar 固定为 65%，Isobutane 从 1%改变到 6%时的单计数率曲线。 . . . 83

图 6. 3Ar 固定为 65%，Isobutane 从 1%改变到 6%时的暗电流曲线. 84
图 6. 4 Isobutane 固定为 4%，不同 Ar 比份下的效率曲线 85
图 6. 5Isobutane 固定为 4%，不同 Ar 比份下的单计数率曲线 86
图 6. 6 Isobutane 固定为 4%，不同 Ar 比份下的暗电流曲线 87
图 6. 7 在 Ar/R134a/Isobutane = 75/21/4 的基本气体中加入不同量 SF_6 的效率曲线 88
图 6. 8 在 Ar/R134a/Isobutane = 75/21/4 的基本气体中加入不同量 SF_6 的单计数率曲线 89
图 6. 9 在 Ar/R134a/Isobutane = 75/21/4 的基本气体中加入不同量 SF_6 的暗电流曲线 89
图 6. 10 工作在最佳高压的 RPC 在不同 SF_6 气体下，效率随甄别阈的变化曲线 90
图 6. 11 SF_6 0.5%，isobutane 3.5%时不同 Ar 含量气体的效率曲线 91
图 6. 12 SF_6 0.5%，isobutane 3.5%时不同 Ar 气体的单计数率曲线 92
图 6. 13 SF_6 0.5%，isobutane 3.5%时不同 Ar 气体的暗电流曲线 92
图 7. 1 RPC 查询界面，其中包含了三种查询方式 103
图 7. 2 RPC 的查询结果显示 104
图 7. 3 阻性板的查询结果显示 105
图 7. 4 RPC 裸室和阻性板的统计页面 106
图 7. 5 在线生成的效率统计直方图 107
图 7. 6 在线生成的阻性板体电阻率直方图 108
图 7. 7 手动输入 RPC 宇宙线测试的环境参数 109
图 8. 1 Geant4 软件包结构图 112
图 8. 2 三维数字化山形图。图中三个红点就是三个实验厅所在位置 114
图 8. 3 三个实验点的 μ 子流强的模拟结果 114
图 8. 4 μ 子击中探测器方向矢量的 X 和 Y 分量分布 115
图 8. 5 大亚湾远点的 RPC 模块阵列. 116
图 8. 6 模块摆放方式示意 116
图 8. 7 故障模块数量与系统整体效率 117
图 8. 8 外围模块与内部模块对系统效率的影响 118
图 8. 9 探测层故障数量与系统整体效率 119
图 8. 10 不同故障层数时系统整体效率的上限与下限 119
图 8. 11 故障 RPC 数量与系统整体效率 120
图 8. 12 故障信号读出道与系统整体效率 121
图 8. 13 RPC 平均效率与系统整体效率 123
图 8. 14 μ 子探测效率与径迹长度的关系[62]. 124
图 8. 15 μ 子入射位置示意图 124
图 8. 16 不穿过水池的 μ 子打出的中子数分布 125
图 8. 17 I 类中子探测数量与 RPC 系统效率. 126
图 8. 18 水中径迹<2m 的 μ 子产生中子数量的分布. 126
图 8. 19 II 类中子探测数量与 RPC 系统效率（径迹<50cm） 127
图 8. 20 II 类中子探测数量与 RPC 系统效率（径迹 50-100cm） 127
图 8. 21 II 类中子探测数量与 RPC 系统效率（径迹 100-200cm） 127

表 格 目 录

表 2.1 各反应堆中微子实验的误差比较 12
表 3.1 效率与 RPC 层数以及符合数的关系..... 28
表 5.1 RPC 探测器宇宙线测试流程表 58
表 6.1 Isobutane4%时，不同 Ar 下工作高压的选择..... 87
表 6.2 SF_6 0.5%, isobutane3.5%时，不同 Ar 下工作高压的选择以及 RPC 性能
..... 93
表 8.1 故障模块数量与系统整体效率..... 117
表 8.2 故障探测层数量与系统整体效率 120
表 8.3 故障 RPC 数量与系统整体效率..... 121
表 8.4 故障信号读出道与系统整体效率 122
表 8.5 不同 RPC 系统效率下，对 I 类中子的探测效率..... 125

第一章　引言

1.1 粒子物理与粒子物理实验

粒子物理，也常称高能物理，是物理学的一个重要分支，主要研究比原子核更深层次的微观世界中物质的结构性质，以及在极高能量下这些微观物质间相互作用的规律和原因。实验是人类认识自然的重要手段，粒子物理学的发展也离不开实验的贡献。理论和实验两者紧密相连并且相互促进，极大地推动了粒子物理的发展。一方面，理论不断的解释实验现象并提出理论模型和预言。另一方面，实验不断地验证理论的预言并发现新的物理现象。可见，粒子物理实验是粒子物理发展必不可少的一部分。

粒子物理实验可概括为粒子源、探测器和数据分析三个组成部分。当前，新一代粒子物理实验的三个研究前沿：加速器物理实验的高能量研究、高亮度研究和非加速器物理（或称粒子天体物理）实验研究。高能量前沿的粒子源以欧洲核子中心(CERN, European Organization for Nuclear Research)目前刚投入运行的质子-质子(P-P)对撞机 LHC(Large Hadron Collider)[1]为代表。在高亮度研究方面走在前沿的是一些 B 粒子工厂，如美国 SLAC(Stanford Linear Accelerator Center)的 BaBar 实验[2]和日本 KEK(High Energy Accelerator Research Organization)的 Belle[3]实验。非加速器物理实验的探测对象一般是低事例率的物理现象，具有高灵敏度、低本底等特点。如日本的 Super-Kamiokande 实验[4]以及正在建造的大亚湾反应堆中微子实验[5]。

1.2 粒子探测器

粒子物理实验取得的每一个成就都离不开粒子探测器的发展。新粒子的发现往往借助于当时的新型探测器，比如 1932 年正电子的发现和 1936 年 μ 介子的发现都借助于云雾室，1939 年核裂变的发现借助于电离室，1954 年 Σ^0 粒子的发现借助于气泡室，1962 年 ν_μ 中微子的发现借助于火花室等[6]。

20 世纪 60 年代到 80 年代以来，响应速度更快的探测器技术得到了快速发展，有机闪烁体、多丝正比室、漂移室、电磁量能器、强子量能器等高速先进的探测器都得到广泛应用。同时先进电子学技术和计算机技术也发展起来，各种高速高性能的电子学如标准快电子学插件 NIM 以及 CAMAC 总线、快总线、VME

总线、PCI 总线系统都迅速发展起来，大大推动了粒子物理实验的发展，使一大批新粒子在此期间得到发现。

80 年代以来，粒子探测器、电子学以及数据获取方面又有了很大的发展，以适应更高能量更复杂的事例测量，如高精度的位置和能量分辨、快时间响应的探测器；高集成度、快响应的电子学；快速大规模数据处理系统。这期间涌现的粒子探测器主要有：闪烁光纤，自淬灭流光管，阻性板探测器，时间投影室，平行板雪崩室，硅微条探测器，微条气体室，气体电子倍增室等。

1.3 论文主要内容和结构

本论文围绕大亚湾中微子实验中的 RPC 探测器展开。工作内容包含了大亚湾 RPC 探测器的前期研究，RPC 探测器的批量生产、质量控制以及 RPC 的宇宙线测试，RPC 工作气体的研究、RPC 数据库的设计以及 RPC 系统整体效率的模拟。

本论文的结构如下：

第一章　引言

第二章　介绍了大亚湾反应堆中微子实验的物理意义、实验目标以及各个子探测器的基本情况。

第三章　介绍了大亚湾 RPC 探测器的前期研究，包括阻性板、读出条的研究以及 RPC 模块的设计。

第四章　介绍了 RPC 探测器批量生产的过程。讲述了 RPC 制作的工艺以及 RPC 的质量控制。

第五章　讲述了 RPC 的质量认证即宇宙线测试。分析了宇宙线测试的结果。

第六章　讲述了对 RPC 工作气体的研究情况。

第七章　讲述了 RPC 质量控制数据库的设计以及开发的功能。

第八章　讲述了对大亚湾 RPC 系统整体效率的模拟。

第九章　是全文的总结和展望。

第二章 大亚湾中微子实验

本章将介绍大亚湾中微子实验的基本情况。主要内容包括：实验的物理目标和意义，实验总体规划，各个子系统的设计以及最终的预期结果。本章的主要内容源于大亚湾实验的设计报告以及各个子系统的技术报告。

2.1 实验目标和意义

根据粒子物理学的标准模型，组成物质的基本粒子共有 12 种，其中三种便是中微子（电子中微子，μ 中微子和 τ 中微子）。中微子不带电，仅参与弱相互作用，是上一世纪三十年代德国物理学家泡利为了解释 β 衰变中能量似乎不守恒而提出的，五十年代才被实验观测到。宇宙中存在大量的中微子，大约为 $100/cm^3$，占宇宙物质总量 0.3% —1%，而可见星系仅占 0.5%。中微子在最微观的粒子物理规律和最宏观的宇宙的起源及演化中都起着十分重大的作用，例如弱作用的宇称不守恒的根源在于自然界只有左旋中微子。在标准模型的假设中，中微子的质量为零，但由于中微子在宇宙中数量巨大，其质量是否绝对为零，对粒子物理，天体物理与宇宙学均具有根本性的影响。由于中微子几乎不与任何物质发生作用，探测中微子的难度非常大，要测量其质量就更难了。

上个世纪 60 年代，Pontecorvo 等人提出如果中微子有质量，并且其质量本征态与弱作用本征态不简并，由量子力学的波函数叠加可以推知，不同的中微子之间可发生振荡，即一种中微子在飞行中变成另一种中微子。对于三代中微子，其振荡概率可以写 MNSP 矩阵：

$$\begin{pmatrix}\nu_e\\ \nu_\mu\\ \nu_\tau\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & c_{23} & s_{23}\\ 0 & -s_{23} & c_{23}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}c_{13} & 0 & s_{13}\\ 0 & e^{-i\delta} & 0\\ -s_{13} & 0 & c_{13}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}c_{12} & s_{12} & 0\\ -s_{12} & c_{12} & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\nu_1\\ \nu_2\\ \nu_3\end{pmatrix},$$

其中 $c_{ij}=\cos\theta_{ij}, s_{ij}=\sin\theta_{ij}(i,j=1,2,3)$。中微子振荡理论以及 MNSP 矩阵的意义在于它提供了一种证明中微子质量不为零的方法。MNSP 矩阵中的 θ_{23} 描述的是大气中微子振荡，θ_{12} 描述的是太阳中微子振荡，它们已经分别由 Homestate, Super – K,SNO 与 KamLAND 等实验先后证实其不为零，即中微子之间发生了振荡。

三种中微子之间振荡的规律可以用六个参数来表示，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}、θ_{23}，以及一个 CP 相位角 δ_{CP}。目前由太阳中微子、大气中微子、反应堆和加速器实验得出的中微子混合的有力证据已经为大家所接受。振荡参数中已测得确切数值的有三个半：$\sin^2 2\theta_{12}$，$\sin^2 2\theta_{23}$，Δm_{21}^2 和 $\left|\Delta m_{32}^2\right|$；未知的包括 $\sin^2 2\theta_{13}$，δ_{CP}，和 Δm_{32}^2 的符号。

精确测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 在理论和实验上都具有重大的物理意义。首先，它是中微子物理中六个最基本的参数之一，其数值的大小决定了未来中微子物理的发展方向。它的大小直接决定了中微子振荡中的 CP 破坏强度。后者是目前最有希望解释宇宙中物质-反物质不对称现象的（leptogenesis 机制）。如果它是如人们所预计的在 0.01－0.03 左右的话，则中微子的 CP 相角可以测量，宇宙中物质与反物质的不对称可能得以解释。如果它太小，则中微子的 CP 相角无法测量，目前用中微子来解释宇宙中物质与反物质不对称的理论便难以证实。其次，$\sin^2 2\theta_{13}$ 接近于零也预示着新物理或一种新的对称性的存在。因此不论是测得 $\sin^2 2\theta_{13}$ 或只给出其上限值，均有极为重要的意义，绝不亚于 SNO 与 KamLAND 实验[7]。第三，它与基本粒子物理的大统一理论有关。它是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我们了解轻子味混合与夸克味混合之间的关系。如果 θ_{13} 不是太小，那么有可能在 1016GeV 能量标度下实现大统一。第四，中微子振荡是第一个，也是唯一一个超出目前粒子物理标准模型的物理现象。影响标准中微子混合与振荡的新物理效应很有可能比 θ_{13} 所引起的次级效应更小。因此精确测定它的数值将使我们能够寻找与鉴别新物理。

目前国际上对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量均未给出肯定的答案，如图 2. 1 所示。Chooz, Palo Verde 与 Super-K 等实验在直接搜寻中未发现 θ_{13} 振荡的实验证据[8]，而利用目前全部中微子实验数据的拟合结果得出的 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的最可几值约为 0.01[9]（相应于 $\sin^2 2\theta_{13}$ =0.04）。而理论上目前对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的预言也相差很大，不同的模型给出完全不同的数值，但基本上集中在 0.001-0.1 之间。因此实验上希望测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的灵敏度应达到 0.01 以下。

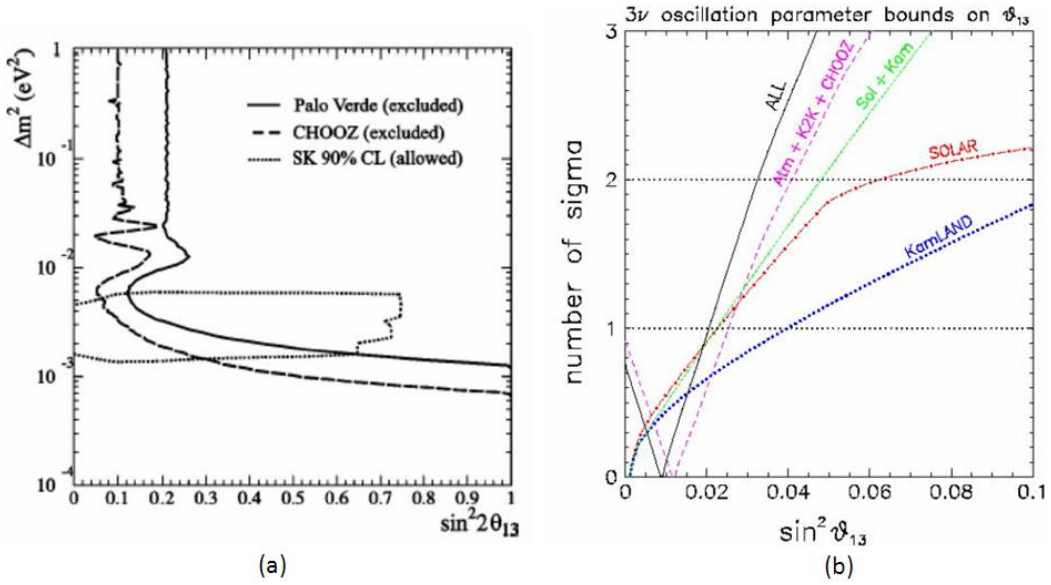

图 2. 1 目前国际上对 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的实验测量。（a）直接测量；（b）数据拟合；

2.2 大亚湾实验总体规划

2.2.1 实验总体设计方案

目前反应堆中微子实验给出的 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的上限为 0.17，对应的实验误差为 3.9%。如果要达到 0.01 的灵敏度，大亚湾就必须把实验总误差控制在 1%以内，这就要求大亚湾总结国外反应堆实验的经验，设计出更加巧妙的方案；并且在实验成本允许的情况下，努力做到：提高统计量以减小统计误差，减小探测器系统误差，严格控制实验本底，具体体现在实验设计上有以下几点：

1．选址在大亚湾附近，充分利用大亚湾的大功率核电站。大亚湾核电站将成为世界上功率第二大的核电站，因此能提供较高的事例率。

2．将探测器放置在核电站附近的山体内，兼顾岩石覆盖厚度与基线优化。合理选取基线，能使中微子的振荡达到极大。厚的岩石覆盖则能大大削弱宇宙线本底的影响。

3. 利用远点和近点探测器做相对测量。除了在最优化基线处放置远端探测器外，在大亚湾两个反应堆核和岭澳四个反应堆核附近分别放置近点探测器，做中微子能谱相对测量。这样可以抵消来自反应堆的关联误差和绝大部分非关联误差。

4. 探测器采用三层结构。最里层是掺钆的液闪作为中微子的靶。将靶包在最里层，靶材料的总量可以定义的很好，这样不需要用事例顶点来做判选。中间层是集能

层， 由普通液闪构成，用来收集伽马光子的能量沉积。集能层可以大大减少能量的丢失，降低判选误差，同时提高判选效率。最外层为矿物油作为防护层。矿物油用来减少来自材料的天然放射性本底，特别是来自光电倍增管玻璃的天然放射性本底，可以把探测器的最低能量阈值降到正电子谱的阈值以下，使正电子的探测效率误差降低到可忽略。

5. 采用多个全同的探测器模块。远点共有四个探测器模块，每个模块 20 吨靶质量，两个近点分别都有两个探测器模块。全同的探测器模块可以使探测器的关联误差抵消，多个模块可以使非关联误差统计性的降低。同时一个实验点的模块之间可以相互验证，及早发现问题，提高实验可靠性。如果需要还可以移动探测器模块，调换远点和近点的探测器模块，可以进一步抵消探测器间的微小差异引起的误差。

6. 使用足够的防护降低本底。使用阻性板（RPC）和水契伦科夫探测器两种独立的 μ 子反符合探测器，使对宇宙线的探测效率达到 99.5%以上。同时将 2.5 米厚的纯水防护层放在 RPC 内以有效隔绝在岩石中产生的中子以及天然放射性。宇宙线在水中或探测器中产生的中子则由于 μ 子被标记，可以通过时间关联去除。

7．在探测器模块的上下两端放置反射板。一方面提高了 PMT 的探测光信号的有效接收角度，另一方面节省了 PMT。这样可以在相同 PMT 个数的情况下提高能量测量精度，减小能量判选带来的误差。

2.2.2 实验布局和基线选取

根据反应堆中微子振荡理论，振荡几率公式可以写成：

$$P(\bar{\nu}_e \to \bar{\nu}_e) = 1 - P_{13} - P_{12} \approx 1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m^2_{21} L}{4E_\nu} - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m^2_{31} L}{4E_\nu} \qquad (2.1)$$

在基线长度 $L \approx 2$ km 的时候，P_{13} 占主导地位，$L \approx 60$ km 的时候，P_{12} 占主导地位。图 2. 2 显示了振荡几率与基线长度的关系。大亚湾实验设计了 3 个实验点，包括两个近点和一个远点。大亚湾实验远点选择在离反应堆 2 km 左右，这时候 P_{13} 振荡几乎达到最大，而 P_{12} 还没有振荡起来，可以忽略。近点则尽量靠近反应堆，以更好的检测反应堆中微子的能谱。同时，实验点的上方要求有足够的岩石覆盖，以减小宇宙线引起的本底。图 2. 3 显示了三个实验点和反应堆的相对位置。

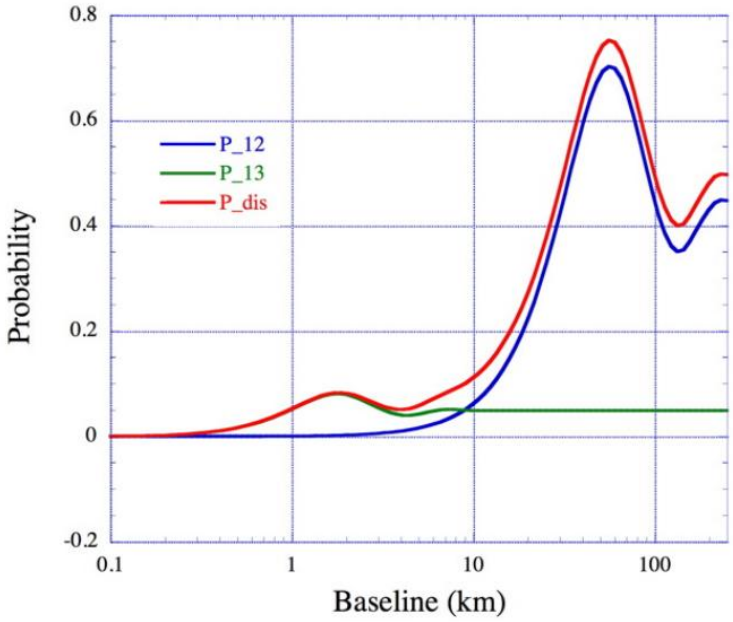

图 2. 2 振荡几率与基线长度的关系

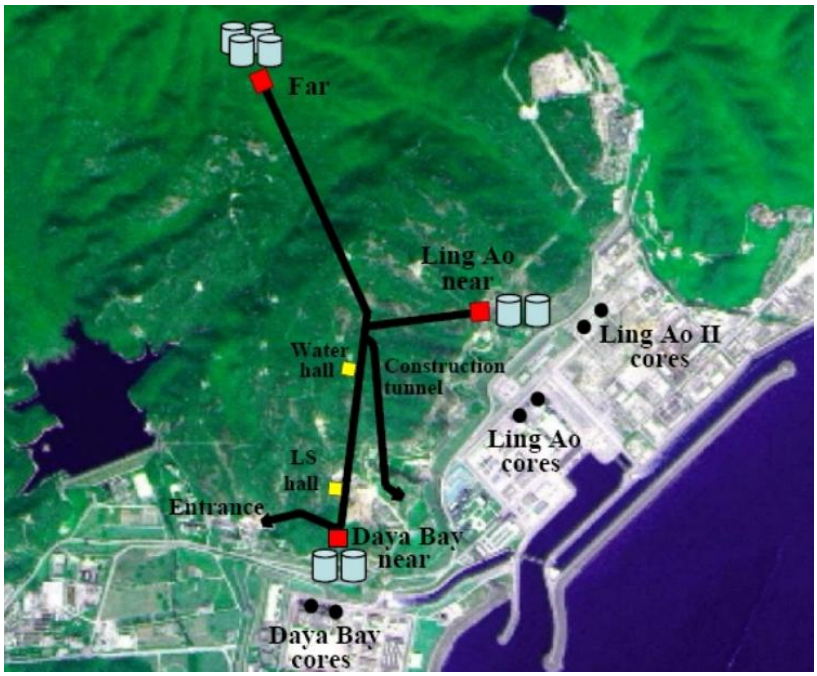

图 2. 3 大亚湾实验布局。近远点探测器和反应堆的相对位置

2.3 探测器

大亚湾的探测器由两大部分组成，一个是探测反应堆反电子中微子的反中微子探测器 (AD)；一个是探测本底的宇宙线 μ 子探测器，即“反符合系统(Veto)”。

反符合探测器共有两种，一种是双层的水契伦柯夫探测器，一种为 RPC 探测器。使用两种独立的 μ 子探测器可以互相检验并确定 μ 子探测效率。契伦柯夫探测器选择纯净水作为介质，在探测宇宙线 μ 子的同时还起到屏蔽介质的作用。反中微子探测器置于水池之中，如图所示。

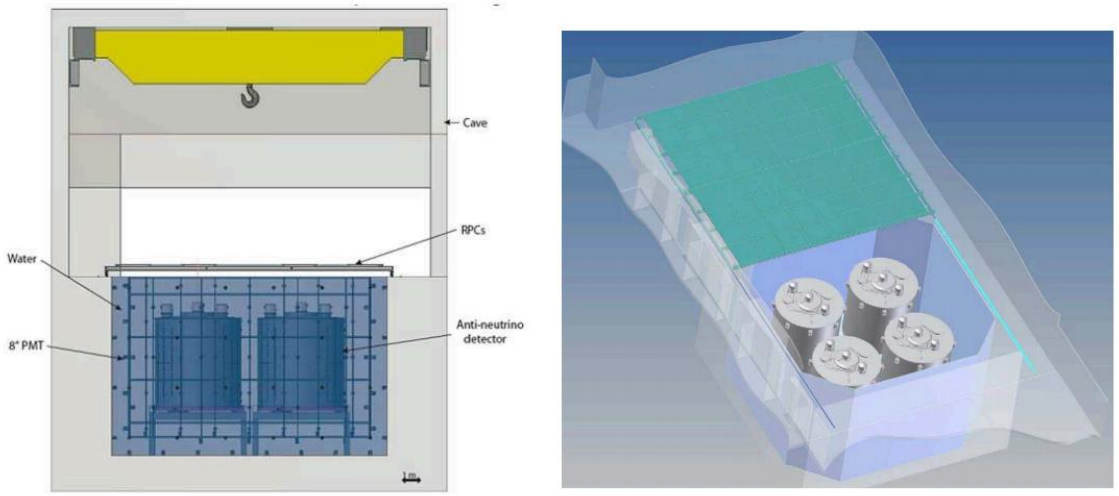

图 2. 4 大亚湾探测器远点实验厅示意图。四个反中微子探测器模块都置于水池中，上下四周均被 2.5 m 以上的水包围以屏蔽本底。在水池中放入光电倍增管做水契伦柯夫探测器，水池顶部是 RPC 探测器，两者构成完整的反符合探测器系统。

2.3.1 反中微子探测器

反中微子探测器用掺 Gd 的液体闪烁体做靶物质，通过反 β 衰变探测反应堆放出反电子中微子。大亚湾实验共有八个这样的反中微子探测器模块，分放于大亚湾和岭澳两个近点实验厅和远点实验厅。其中远点实验厅有四个，两个近点实验厅各放两个。反中微子探测器为直径 5 m，高 5 m 的圆柱体，分三层，由内到外依次是：掺 Gd 液闪层、普通液闪层和矿物油层，如图 2. 5 所示。三个罐状容器分隔和支撑这三层液体：最内层和次内层是有机玻璃制成的容器，最外层是不锈钢制的外罐，矿物油层中紧贴有机玻璃罐上下表面的是反射板。I 区为 20 吨含 0.1% Gd 的液体闪烁体，它是探测中微子的有效靶质量；II 区是普通液闪层，其作用是辅助收集掺 Gd 液闪层中中子俘获发出的光子的能量，保证由内有机玻璃罐定义的掺 Gd 液闪就是反电子中微子探测的靶，好处是不需要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只决定于质量测量的精度；III 区是矿物油层，其作用是屏蔽由于光电倍增管玻璃或者由于其他材料以及不锈钢外罐中可能的天然放射性本底。

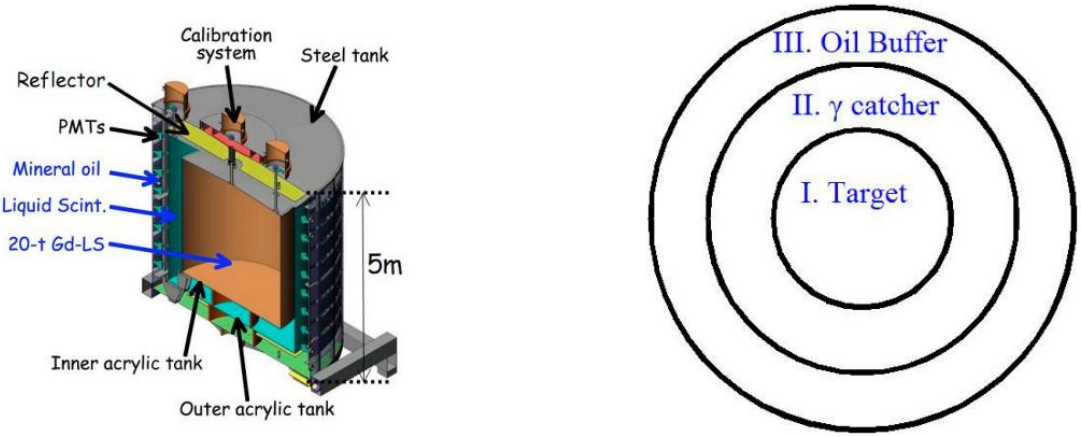

图 2. 5 反中微子探测器剖面图（左）和三层介质示意图（右）

每个探测器有 192 个光电倍增管（PMT）安装在矿物油层中分为 8 圈位于探测器的侧壁上，光电倍增管感光面朝向中心液闪。光阴极有效覆盖率为 12%，用于接收来自灵敏探测区来的光信号。反射板的目的是在减少光电倍增管数量的前提下，保证光的有效收集，从而保证对灵敏探测区有足够的探测效率。图中各层上端盖上的盒子中安装了自动刻度装置和溢流罐，自动刻度装置为探测器标定系统的一部分，密封的溢流罐可以防止探测器内的液闪因热胀冷缩效应而溢出，保证探测器靶质量不变。

反电子中微子的探测原理可以用反 β 衰变方程式表示：

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \tag{2.2}$$

在反应的末态产物中，e^+带走几乎全部的动能并最终湮灭，总能量沉积为 1.8 MeV 到 8 MeV，此过程在反 β 衰变反应发生后几纳秒之内完成，称为快信号。中子经过约 28 μs 的特征时间被 Gd 俘获并放出总能量为 8 MeV 的光子，称为慢信号。快慢信号的符合测量可以有效地排除本底确定中微子事例。这样可以在一定的能量范围和时间范围内挑选反应堆中微子：1）快慢信号符合时间 1 – 200 μs；2）快信号能量 1 – 8 MeV，慢信号能量 6 – 10 MeV。使用掺 Gd 的液闪大大缩短了中微子快慢信号之间的时间间隔，有利于减少偶然符合的本底；另外俘获中子产生的光子信号能量远高于天然放射性本底信号的能量，这样可以大大减少本底的事例率，增加信噪比。

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射线产生的 μ 子及其产生的次级粒

子。减小这类本底的主要方法是将探测器放置在水底下并尽可能地增加探测器的岩石覆盖。实验厅周围的岩石会释放出大量的 γ 光子，而且 μ 子穿过实验厅周围的岩石时会发生核散裂，所以我们用 2.5 m 厚的水包围反中微子探测器，从而把这两种事例产生的本底减少到最低。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。中子穿过此水屏蔽层后，也将被压低两个数量级。此外，水屏蔽层还将反中微子探测器与空气隔绝开来，可以降低空气中的氡气带来的本底。宇宙线在水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，因此实验采用四周水契伦柯夫探测器、顶部 RPC 探测器的联合探测系统来标记穿过水屏蔽层的 μ 子事例。

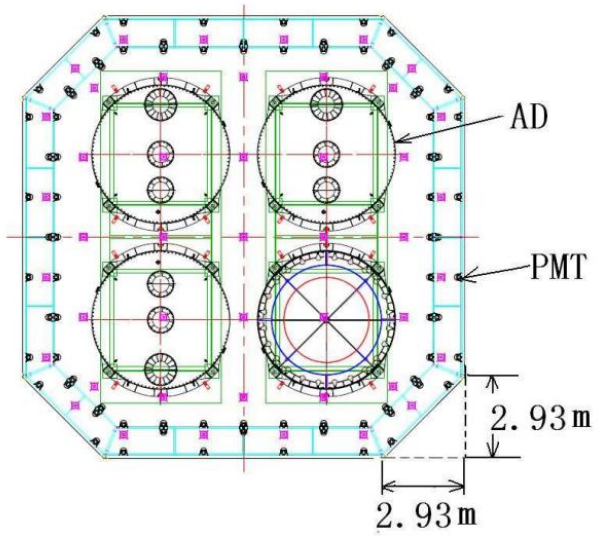

图 2. 6 远点探测器的结构图（俯视）

大亚湾远点的水池如图 2. 6 所示。水池为八角形，长宽各 16 m，深 10 m。四个去掉的角边长为 2.93 m。近点处的水池大小为长 16 m、宽 10 m、深 10 m，也为八角形，去掉的四个角边长也为 2.93 m。之所以设计为八角形，是因为在保证水层厚度 2.5 m 的前提下，更有利于内部水的循环，同时也减少了土建的费用。反中微子探测器模块被浸置在装有高纯水的水池里，反中微子探测器模块之间被 1 m 厚的水分隔。反中微子探测器模块距池壁的最小距离为 2.5 m。水屏蔽层被不锈钢钢架结构上的 Tyvek 反射膜分隔，内外水池都使用 Tyvek 膜来作为反射膜，且钢架结构上按空间位置均匀分布安装了适当数量的光电倍增管（覆盖率 0.8%），构成了内、外两层水契伦柯夫探测器。水池的外层和底部的水厚度均为 1 m。

在水池顶部的是 RPC 系统。RPC 系统是由尺寸为 2.3 m × 2.3 m 的 RPC 模块群组成的。在远点水池上共覆盖 9×9 个 RPC 模块；在两个近点水池上各覆盖 6×9 个 RPC 模块。RPC 模块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 RPC 模块由 4 层 RPC 探测器组成，假设单层 RPC 的探测效率为 95%，那么 RPC 模块在 4 选 3 的触发模式下效率将达到 98.6%。RPC 信号的读出采用 x，y 二维读出，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 RPC 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，确定各自的探测效率。

2.4 实验误差和预期结果

大亚湾实验的误差可以分为统计误差和系统误差两方面。统计误差主要取决于中微子事例的多少，这可以通过选择合适的探测时间和探测靶质量来降低统计误差，计算表明，在远点选择 80 吨探测靶质量和运行三年的时间可以取得足够的中微子事例，统计误差 $< 0.2\%$。

实验比较困难的是对系统误差的控制。反应堆中微子实验的系统误差主要有三个来源：来自反应堆的，来自探测器的，以及来自本底的误差。与反应堆和探测器相关的误差又分为关联误差和非关联误差。根据以往的实验，与反应堆相关的误差约为 2%，本底误差则取决于实验的防护，不同实验相差很大。实验成功的关键在于如何有效地减小甚至消除这些误差。

大亚湾实验采用远近点探测器相对测量，通过使用全同的探测器抵消了探测器的关联误差。足够的防护层，使得噪声跟信号比例小于 0.3%。与以前的三个反应堆中微子实验 CHOOZ、Palo Verde 以及 KamLAND 相比，预期的实验误差见表 2. 1，表中同样列出了与大亚湾竞争的 Double CHOOZ 实验的系统误差。

图 2. 7 给出了大亚湾实验预期的 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的灵敏度曲线。由于反应堆中微子振荡几率由 Δm^2_{23} 和 $\sin^2 2\theta_{13}$ 共同决定，图中给出了这两个参数平面上的灵敏度曲线，运行时间为三年。跟 CHOOZ 实验相比，实验精度提高 20 倍左右，在 Δm^2_{23} 取中间值的时候，预期 $\sin^2 2\theta_{13}$ 灵敏度可以达到 0.009。

表 2. 1 各反应堆中微子实验的误差比较

%		Palo Verde	KamLAND	CHOOZ	D-CHOOZ	大亚湾
反	反应堆功率	0.7	2.05	0.7	0	0.14
应	核燃料成分	2.0	2.7	2.0	0	
堆	反应截面	0.2	0.2	0.3	0	0
	碳氢比	0.8	1.7	0.8	0.1	0.2
	总质量	-	2.1	0.3	0.2	0.2
	正电子能量	3.6	0.26	0.8	0.1	0.05
探	位置关联	3.6	3.5	0.32	0.0	0.0
测	时间关联	3.6	0	0.4	0.2	0.2
器	中子能量	3.6	-	0.4	0.2	0.2
	中子俘获	3.6	-	1.0	0.2	0.1
	中子多重度	3.6	-	0.5	0.0	<0.1
	死时间	0.2	0.2	-	0.25	0.03

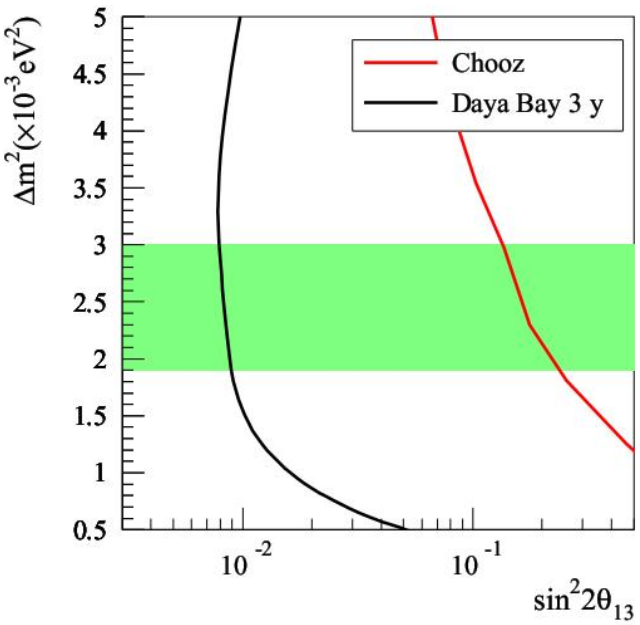

图 2. 7 大亚湾实验与 Chooz 的预期灵敏度

第三章 RPC 探测器的研制与前期研究

3.1 RPC 探测器

RPC 探测器是上世纪 80 年代由意大利的 R.Santonico 等人在丝室基础上开发出来的一种新型气体探测器[10]。它由两层高体电阻率的平行板组成，分别加正负高压形成均匀电场，中间通以工作气体。当高速带电粒子穿过气隙时，在气体中沉积能量，并产生雪崩或者流光信号。由置于探测器外侧的感应读出条拾取信号，达到探测带电粒子的目的。

RPC 探测器的主要优点是时间分辨率好（≤1.5 ns），主要限于读出条的传播时间，工作效率高（>95%），机械结构和读出电子学简单，电极板材料便宜，制造成本低廉，因此在大面积高能粒子探测领域的应用价值非常高。和传统的火花室探测器相比，RPC 探测器有两个主要的改进。一是采用了高电阻率的电极板，把信号局限在了带电粒子穿过点周围的一个很小的区域。二是信号为电脉冲，可以用电子线路读出而无须用照相的方法。近年来，RPC 在高能粒子物理实验、大型宇宙线实验、中微子实验中得到了广泛的应用，例如美国的 BaBar[11]、STAR[12]，日本的 Belle[13]，欧洲的 OPERA[14]、LHC[15][16][17]，中国的 BESIII[18]和羊八井[19]等。

3.1.1 RPC 的工作原理

作为一种气体探测器，RPC 的工作原理主要建立在粒子与介质的相互作用以及气体的电离放电的基础之上。RPC 信号的产生一般经过以下几个过程：

1) 带电粒子入射；
2) 工作气体电离；
3) 气体放大；
4) 信号感应读出；

当快速带电粒子穿过 RPC 的气隙层时，与穿越路径上的气体分子产生碰撞，将有可能使气体分子产生激发或者电离。带电粒子则因此损失能量，称为电离能损。电离能损在高能物理中是一个很重要的概念，通常用单位约化介质层厚度（g/cm^2）中的能量损失$-(dE/dx)$来表示。入射粒子的电离能损导致气体中电子离子对的产生，这就是产生信号的基本电离，称为初级电离。这些初级电离粒子在气体内部

高压电场的作用下还将继续运动。由于电子的质量比离子要小很多，在相同的电荷相同的场强下获得的加速度也高很多。当气隙内的电场强度足够大时，这些电子在任意两次碰撞之间均可加速至足够的能量而进一步电离其他气体分子。这个过程不断发展，电离就呈指数递增，形成雪崩。在径迹上的雪崩电子以束团（cluster）分布，高速向阳极漂移。如图 3. 1 所示。由于 RPC 的两个电极是平行的，因此内部的均匀电场可以保证在气隙之间的任何地方电子都能迅速发生雪崩。雪崩信号的特点是信号上升时间小，因此时间分辨非常好。

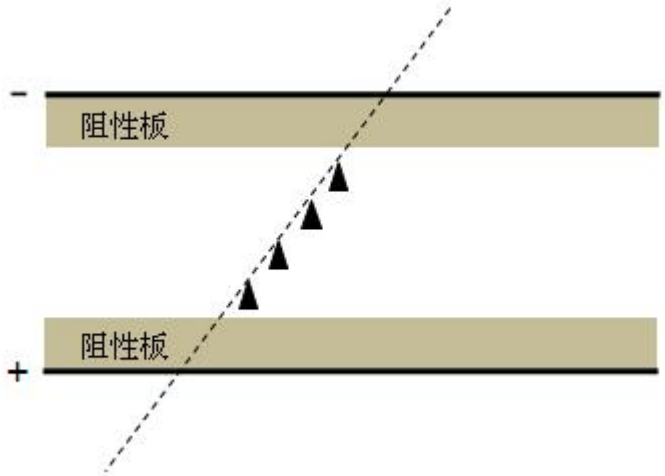

图 3. 1 RPC 中的雪崩放大倍增

雪崩信号进一步发展将会形成流光过程。产生流光信号的基本条件是：

1) 有足够长的高电场区（垂直于电极表面方向有毫米量级的长度）
2) 偶极子端头部空间电荷外的初级雪崩电场要比外电场强度大或者相当，即满足 Meek 条件：

$$E = KE_r = K(\frac{4\varepsilon\alpha}{3r}e^{\alpha x}), K \approx 1 \tag{3.1}$$

其中，α 是第一汤姆森系数，ε 是电子电荷，x 为雪崩增长的距离，r 为雪崩空间电荷球半径。否则新雪崩产生的电子就会回落到正离子空间电荷头部而被中和掉，抑制次级雪崩的发展。

3) 初级雪崩必须产生能量足够高的光子，并且光子的自由程不大于雪崩尺寸。这就要求大部分光子在初级雪崩头附近被吸收并产生电子，从而维持流光的持续和扩展，即 Loeb 条件：

$$\frac{4}{3}K^2 r\alpha f e^{\alpha\delta} = \frac{4}{3}(\frac{\Omega}{4\pi}e^{-\mu x})^2 r\alpha f e^{\alpha\delta} = 1 \tag{3.2}$$

其中 Ω 为从“液滴”头部光子出射的立体角范围，μ 为光子的吸收系数，α 为第一汤姆森系数，δ 为雪崩头部到阳极的距离。如果光子自由程过大，流光就不能持续，因此要使 RPC 工作在流光模式下，工作气体中需要添加能淬灭光子的气体以减小光子的自由程。

4) 电极间距离必须足够大使得流光头在离阴极一定距离时得到抑制，否则将形成火花放电。所以在 RPC 工作气体中往往添加淬灭性气体如甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷等。

当 RPC 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。这些感应电荷被阻性板（相对介电常数 3~8）吸收掉一部分，然后由 RPC 外侧的感应读出条拾取信号。

3.1.2 阻性板材料

阻性板作为 RPC 探测器的电极，是 RPC 最关键的组成部分，可以说阻性板的好坏直接影响 RPC 的工作性能。目前世界上主要采用玻璃（glass）或者酚醛树脂（bakelite）作为阻性板的材料。如 BELLE，STAR 均采用了玻璃 RPC，而 BaBar，ATLAS，CMS 则采用了酚醛树脂作为阻性板。玻璃材料的优点是硬度大，表面光滑度比较好，体电阻率比较均匀，受湿气影响比较小，缺点是易碎。酚醛树脂克服了玻璃易碎的缺点，但是表面光洁度不如玻璃好。提高表面光洁度的一个方法是在表面涂油。国外一般采取的是涂蓖麻油（linseed oiled）的工艺。但是涂油之后的阻性板也会产生诸如加速老化等新的问题[20]。中科院高能物理研究所 BESIII MUC 课题组与高能科迪公司合作，结合国内绝缘材料行业的已有产品、技术和经验，研发了一款具有自主知识产权的阻性板，并成功应用于 BESIII RPC 探测器[21][22]。

该阻性板的材料为酚醛树脂（也称为电木），在绝缘行业是一种比较常用的材料。它主要由苯酚、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。阻性板体电阻率的调节是通过在生产过程中对原料的配比来实现的。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。另外，为改善表面光洁度，在阻性板的表面还覆了一层三聚氰胺薄膜。图 3. 2 显示了该阻性板与 BaBar 阻性板表面光洁度的比较情况*，可以看到

* 由美国普林斯顿大学陆昌国教授帮助完成

BESIII 阻性板的表面突起程度要明显小于 BaBar。

采用了新型阻性板的 BESIII RPC，经过了宇宙线测试[23]和试运行[24]的考验，其性能的可靠性和长期运行稳定性已经得到了验证。因此，高能所继续与高能科迪公司合作，生产用于大亚湾的 RPC。有了 BESIII 上经验的积累，大亚湾 RPC 在原有的技术基础上，进一步加强了质量上面的控制，特别是将体电阻率控制在 0.5 – 2.5 $\times 10^{12}$ Ωcm 之内，使各个 RPC 的性能更趋于一致，以更好地发挥粒子探测的作用。

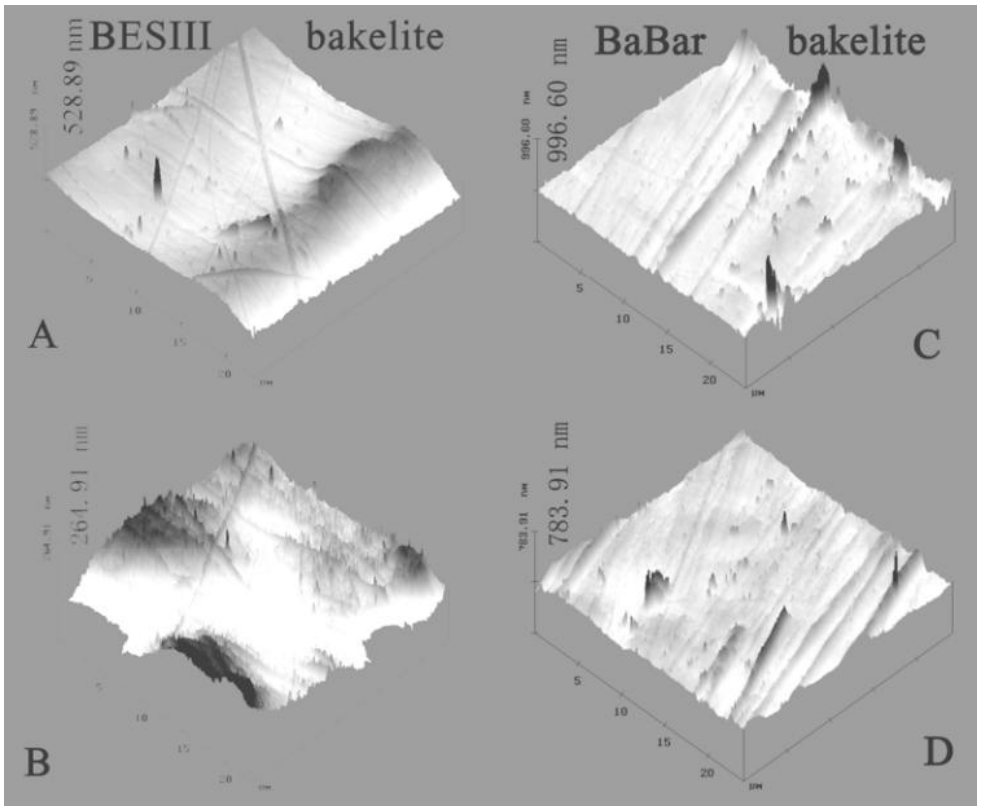

图 3. 2 BESIII 阻性板和 BaBar 阻性板表面比较

3.1.3 RPC 的性能指标及其影响因素

RPC 的性能指标主要有：探测效率、噪声水平、暗电流、使用寿命、计数能力、时间分辨、空间分辨等。对于大亚湾实验来说，比较关注的是前四个指标，同时也是质量控制的主要对象。影响 RPC 性能的因素有很多，总的来说可以分成三类：

1. 探测器本身相关的因素，包括电极材料的体电阻和介电常数，表面的光洁度和导电层的电阻率；

2. 环境因素，主要指温度湿度和气压；

3. 运行条件因素，主要指工作气体、工作高压、工作模式、工作气体流速等。

3.1.3.1 探测效率

探测效率往往是粒子探测器最重要的一个性能指标。对于 RPC 来说，探测效率首先取决于气隙的厚度以及单位厚度上产生的平均电子离子对的数量。不同气体产生的平均电子离子对数量是不同的，这跟气体分子的等效电离势有关。其次探测效率还取决于气体增益，这主要跟气体分子的平均自由程以及气隙间的电场相关。气体平均自由程可以用下式来表示：

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2\pi} d^2 P} \tag{3.4}$$

其中 T 是温度，P 是压强， k_B 是波尔茨曼常数，d 是气体粒子的直径。显然平均自由程 λ 与绝对温度 T 成正比，与气压 P 成反比。

对于气隙厚度和气体比分都固定的 RPC 来说，探测效率主要随着高压，阻性板阻值，以及气温、气压的改变而改变。前两者影响的是气隙的电场强度，后两者影响的是气体的密度或者说平均自由程。图 3. 3 显示了同一个 RPC 在不同温度和气压条件下，其效率随高压的变化曲线。从图中可以看到随着绝对温度和气压之比 P/T 的改变，效率曲线明显发生了偏移。P/T 的值越大，曲线越偏向于更高的高压。如果用效率达到 50%时的高压值 V50 来代表该效率曲线的位置，其与 P/T 的值基本呈线性关系，如图 3. 4 所示。其中方点是直接加在阻性板电极上的高压，而圆点是真正加在气隙上的高压（扣除了阻性板上的压降）。

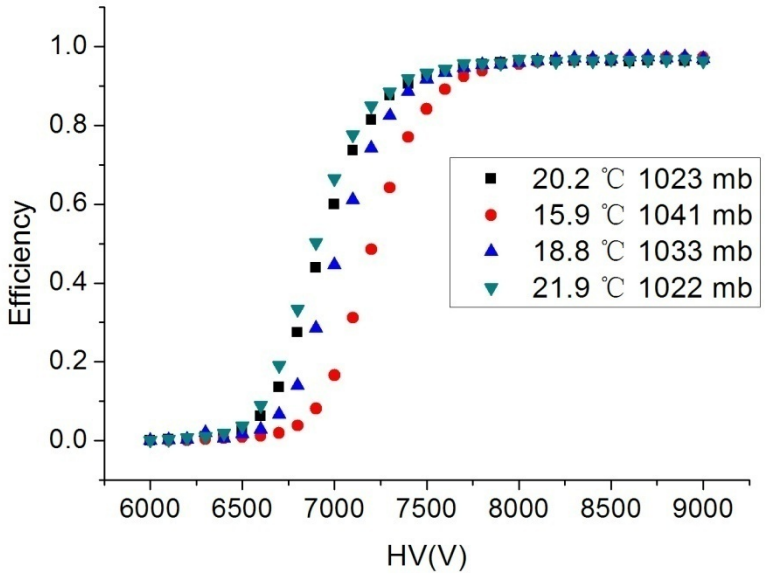

图 3. 3 不同温度气压条件下 RPC 效率随高压的变化

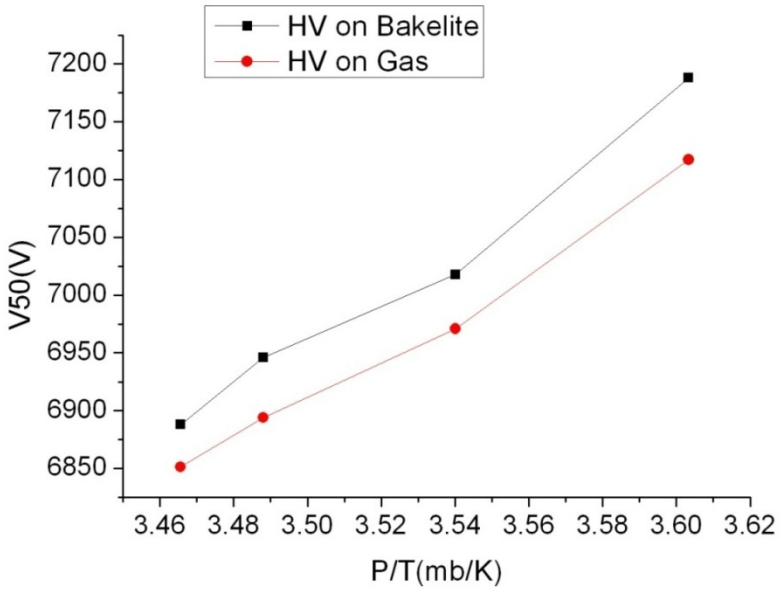

图 3. 4 效率曲线随 p/T 的偏移关系

甄别阈的设置也会影响实际测得的 RPC 效率，尽管它并不改变 RPC 本身。由于 RPC 的信号被电子学读出时夹杂着大量的噪声，而且这些噪声有相当一部分幅度非常小（几十 mV 之内），电子学甄别阈的设置就是为了排除这些小噪声的影响。但如果甄别阈取得过高，则会将一些幅度较小的信号排除掉，使得效率降低

如图 3. 5 所示。

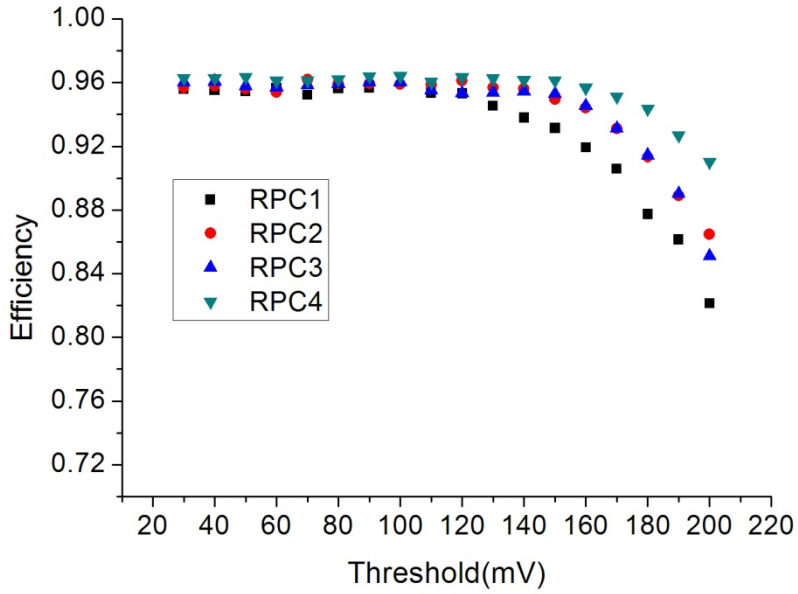

图 3. 5 RPC 效率随甄别阈的变化（工作高压固定）

另外，为保持 RPC 气隙厚度而使用的垫片（spacer）形成了 RPC 探测器的死区，从而影响整个探测器的效率。

3.1.3.2 噪声水平和暗电流

噪声水平描述的是非粒子引发的探测器电子学的不期望的响应。暗电流可以看作是探测器的噪声电荷放电产生的，因此两者总是同时升高或降低。电极表面的光洁程度对噪声的影响也很大，表面越光洁，噪声就越低。此外，气体成分也能极大的影响噪声水平和暗电流，这取决于气体的增益能力和淬灭能力（在第六章 RPC 气体研究部分中将会详细讲到）。同效率一样，噪声水平和暗电流也跟气体的温度和气压密切相关。我们通常用单位时间单位面积 RPC 上的所有计数来描述噪声水平（尽管其中包含了少量真正的宇宙线信号），称作单计数率（Single Counting Rate,或 SCR）。图 3. 6 表示的是同一个 RPC 在不同温度和气压条件下，其单计数率和暗电流随高压的变化关系。很显然，单计数率和暗电流都随着高压的升高而上升。P/T 的值越大时，单计数率和暗电流就越小。也就是说要达到同样的单计数率和暗电流，RPC 所加的高压就要更高，这与图 3. 4 中的结果相吻合。

另外甄别阈的设置也会影响 RPC 的噪声水平，甄别阈越高，单计数率就越小，如图 3. 7 所示。结合图 3. 5 和图 3. 7，就不难发现如何选择合适的甄别阈，那就是首先保证不影响探测效率，其次又能尽量地排除噪声，在本例中，选择小于 100 mV 的甄别阈是合适的。需要说明的是，随着工作环境温度气压的变化，以及 RPC 探测器的个体差异，信号谱和噪声谱都会发生偏移，而探测效率又往往是我们最关心的指标，所以甄别阈的选取也需要留有余量，适当取低一点（例如 50 mV）。

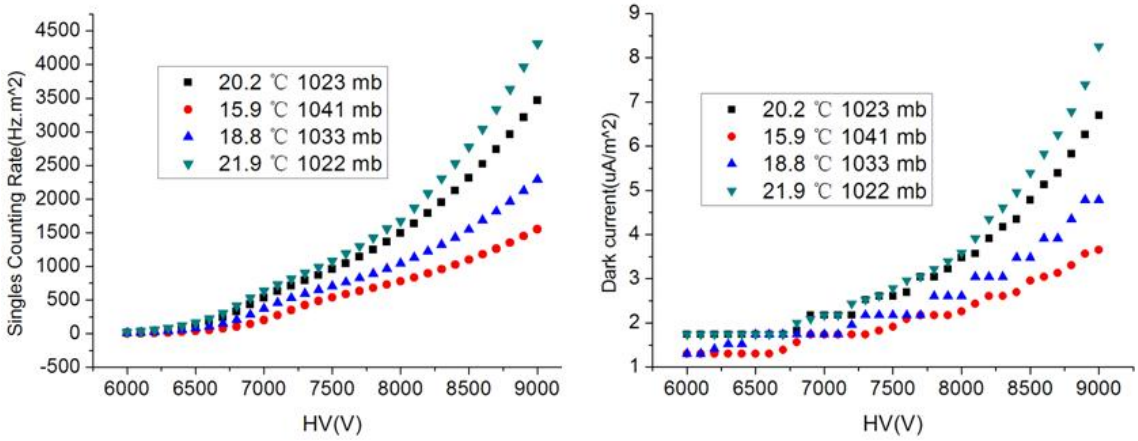

图 3. 6 不同温度气压条件下单计数率（左）和暗电流（右）随高压的变化

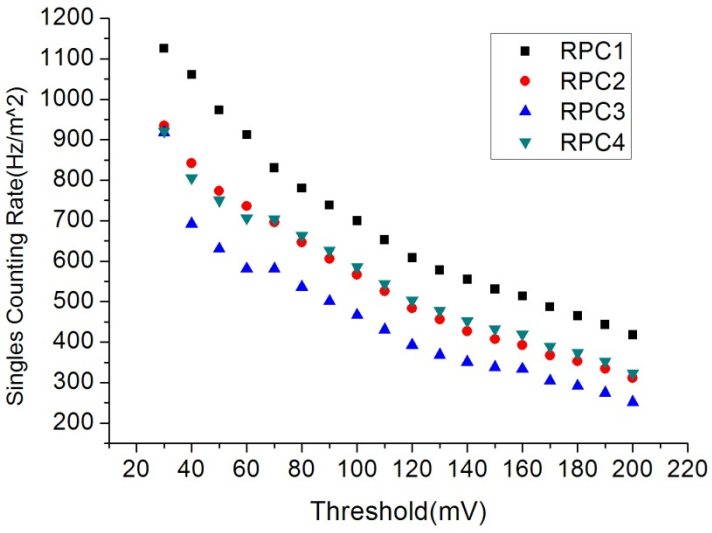

图 3. 7 RPC 单计数率随甄别阈的变化（工作高压固定）

3.1.3.3 工作寿命及老化

工作寿命考验的是探测器的工作的稳定性和持续性。由于老化效应，探测器的运行时间是有限的。过去的实验表明老化速度正比于 RPC 工作期间的累积放电电荷。这个可以简单地从流光模式 RPC 比雪崩模式 RPC 老化更快得到证明[25]。在流光模式下，工作期间的累计放电电荷可以通过选择合适的气体使用较低的高压来减少，从而减慢老化速度[26]。

含有氟利昂的工作气体会在高压下因为氟利昂的分解而产生氢氟酸（HF）[27]，以致于腐蚀阻性电极而缩短 RPC 的工作寿命。实际上，HF 只有在水气中电离才会腐蚀电极，因此使用干燥的工作气体可以减小 HF 的腐蚀效应。但酚醛树脂电极的体电阻严重依赖于湿度，如果工作气体过于干燥，在长期通气运行的过程中会使阻性板内部水分流失从而使体电阻率上升。另外，有报道称在加入水气之后带来的探测效率下降可以通过通入氨水气来恢复[28]。

关于导电漆，已经观测到石磨导电层的电阻率会随着累计放电电荷的增长而升高，这可能是因为其中的导电成分和离子之间的化学反应。但是改善型的石墨的抗老化性能要好很多[26]。

3.2 大亚湾中的 RPC 探测器

大亚湾的三个实验厅均有 RPC 覆盖。其中大亚湾近点和岭澳近点各需要 6×9 = 54 个 RPC 探测器模块，远点需要的 9×9 = 81 个。另外每个实验厅还需要两个模块安装在两侧墙面离地 2 m 高处作为 telescope，总计需要 195 个 RPC 模块。一个 RPC 模块由 8 个 RPC 裸室组合而成，分为 4 层，每层包含一大一小两个 RPC。所以大亚湾实验总共需要约 1600 个 RPC，总面积达 3500 m^2 以上。

RPC 模块集成了 RPC 的读出条、高压线和气管，内部有阳光板和蜂窝板起到支撑和隔离的作用，外部是一个铝制外壳，尺寸约为 220×220×8 cm^3。如所示。RPC 模块将利用钢制的支撑架，层叠平铺于水池上方，如图 3. 8 所示，以消除模块边缘死区带来的影响。

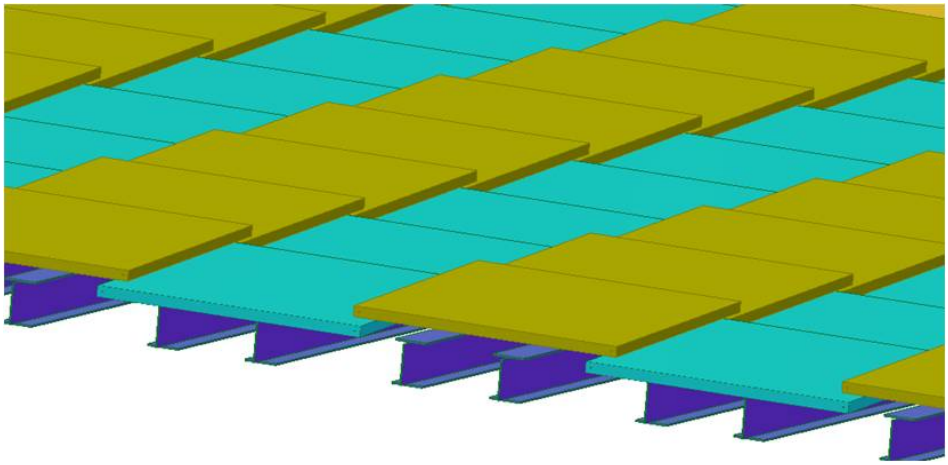

图 3. 8 RPC 模块摆放示意

3.2.1 信号读出条研究

RPC 的信号是由紧贴 RPC 表面的读出条来感应读出的。读出条的宽度决定了 RPC 的空间分辨率。设读数条的宽度为 w，信号在宽度方向上的分布是均匀分布，则其对应的归一化概率密度函数如下式所示：

$$f(x)=\begin{cases}1/w, & -w/2<x<w/2\\ 0, & other\end{cases} \tag{3.5}$$

那么其本征空间分辨率（分布的均方根偏差）为：

$$\sigma_w=\sqrt{\sigma_w^2}=\sqrt{\int_{-w/2}^{w/2}f(x)\times(x-\bar{x})^2dx}=\frac{w}{\sqrt{12}} \tag{3.6}$$

显然，读出条的宽度越小，空间分辨率就越高。对于大亚湾实验来说，由于 RPC 应用面积非常大（3500 m^2 以上），如果过分追求空间分辨率，其结果就是电子学的开销将大大增加。在大亚湾 RPC 预研阶段，我们针对信号读出条也进行了一些相关的实验。

3.2.1.1 匹配电阻

匹配电阻是信号读出条与地之间的连接电阻。呈长条状的读出条其信号传输可以近似等效为传输线，通过良好的电阻匹配后，信号可以传输到很远而损失很小。匹配电阻的最佳值由下式给出[29]：

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

$$Z_L = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}[\frac{w}{h}+1.393+0.667Ln(\frac{w}{h}+1.44)]},(w/h\geq 1) \quad (3.7)$$

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

这里 w 是读数条的宽度，h 是读数条的厚度，一般情况下 w/h 总是远远大于 1，ε_r 是读出电极之间介质的介电常数，ε_{eff} 是考虑考虑读数条边缘效应（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。

如果取 RPC 阻性板的介电常数为 3，气体的介电常数为 1，对于 w=5 cm 的读出条，由 3.7 式可以计算得到 $Z_L \approx 25.5\ \Omega$。这给我们选取合适的匹配电阻提供了有用的参考。在实验中，可以根据实际情况在参考值周围作适当调节。

3.2.1.2 直线型读出条

直线型读出条是指感应信号产生后在读出条上沿着直线传送到信号读出端的读出条。当时对于大亚湾 RPC 究竟用多长的读出条，主要有两种方案。一是用 2 m 长的读出条（与 RPC 长度相匹配），这样读出条和 RPC 可以装在一个独立的模块里面。另一方案是参考 OPERA 实验[30]，使用长读出条，贯穿整个 RPC 阵列（OPERA 用的长度是 8 m），其好处是可以降低电子学道数，从而降低大量的预算。我们对不同宽度和长度的直线型读出条都进行了实验。

图 3. 9 是宽度分别为 5 cm，10 cm，15 cm，20 cm 和 25 cm 的 2 m 长读出条上读取的信号余辉图。首先，不同宽度的读出条都有比较良好的信号。其次随着读出条宽度的增加，信号幅度相应减小了，如图 3. 10 所示。图中是幅度值都是取 5120 个信号的平均值，阈值卡为-40 mV。

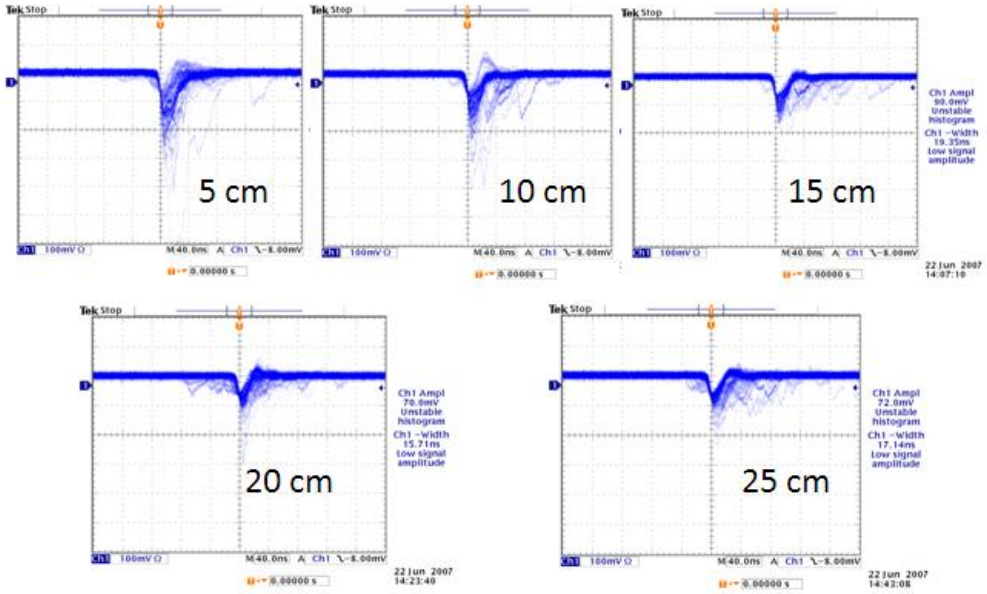

图 3. 9 不同宽度的 2m 长读出条信号余辉图

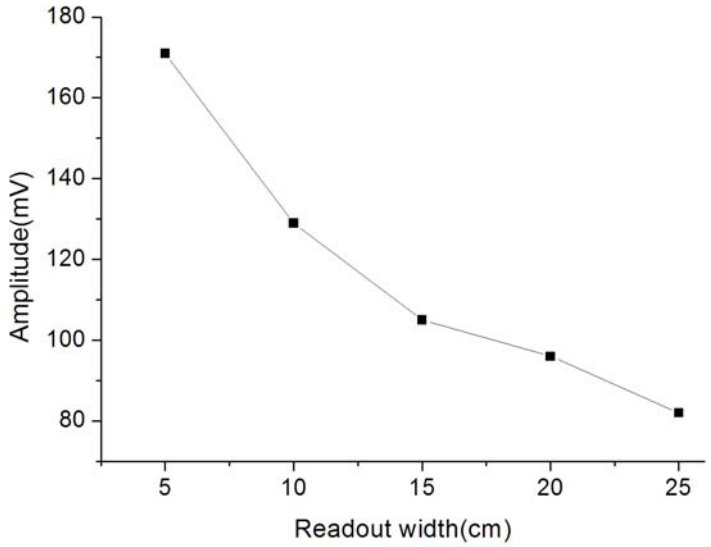

图 3. 10 不同宽度的 2m 读出条的信号幅度比较

图 3. 11 是不同宽度的 6 m 长读出条的信号情况，也同样列出了宽度在 5 cm，10 cm，15 cm，20 cm 和 25 cm 时候的信号余辉图。使用 6 m 长的信号读出条，也可以得到较为清晰的 RPC 信号，但是比 2m 读出条要乱，存在着轻微的反射现象。原因可能是匹配电阻没有选到最佳，另外在传输的过程中，长的读出条受到干扰的几率也比较大。对每种宽度的读出条，取 10 组 512 个信号的幅度平均值作平均，

其值如图 3. 12 所示。其变化规律与 2 m 读出条类似，当读出条宽度增加时，幅度逐渐变小。

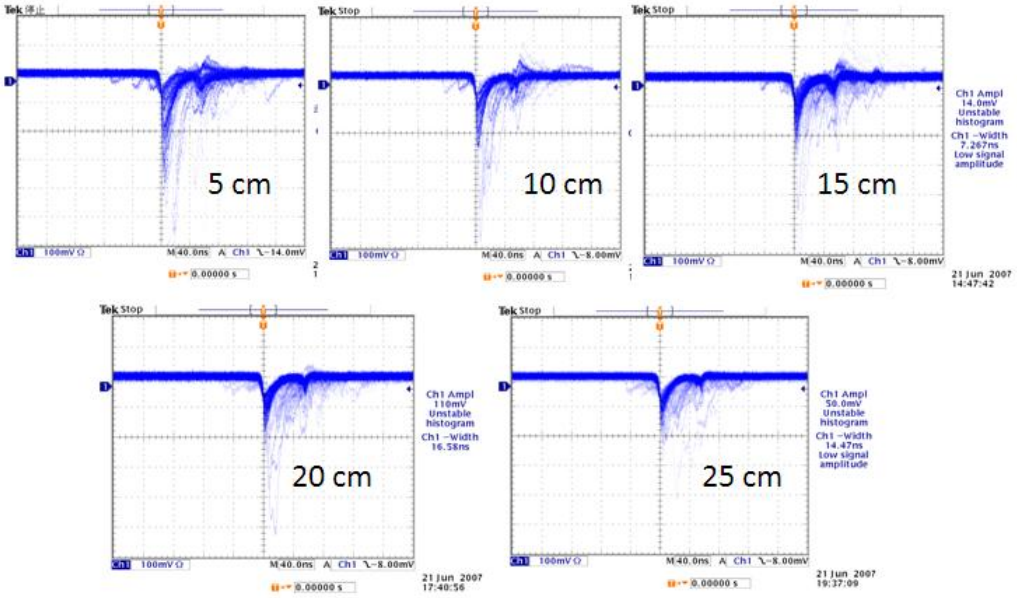

图 3. 11 不同宽度的 6m 长读出条信号余辉图

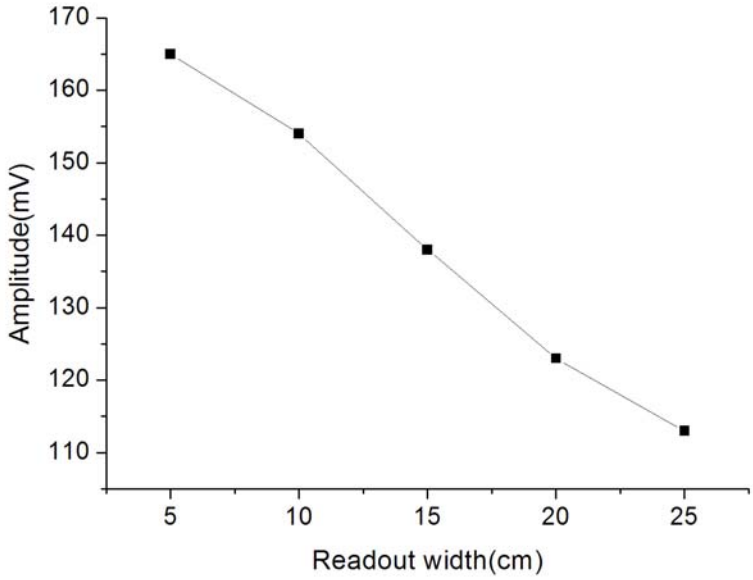

图 3. 12 不同宽度的 6m 读出条的信号幅度比较

总的来说，这两种直线型读出条均能胜任 RPC 信号读出的任务。2 m 读出条由于面积小，传播距离短，读出的信号比长读出条更加清晰。但是如果当条宽较

大时，信号的幅度将大幅下降，这样容易与 RPC 的噪声混合而不易甄别；而取较小的条宽时，又势必大大增加电子学的开销。

3.2.1.3 “Z”型读出条*

为了达到既节省电子学，又获得较高幅度信号的目的，我们设计了“Z”型读出条[31][32]。其结构如图 3. 13 所示。“Z”型读出条尺寸约为 200×25 cm^2，其特殊之处是中间均匀分隔成宽度相等的细条并在端部连接。如果不考虑在转弯时候的反射，信号在此“Z”型读出条上传播等效于在 800×6.25 cm^2 的长读出条上传播，可以期望获得较好的 RPC 信号。

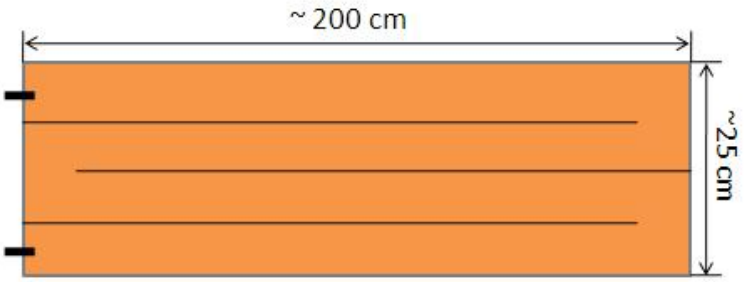

图 3. 13 “Z”型读出条示意图

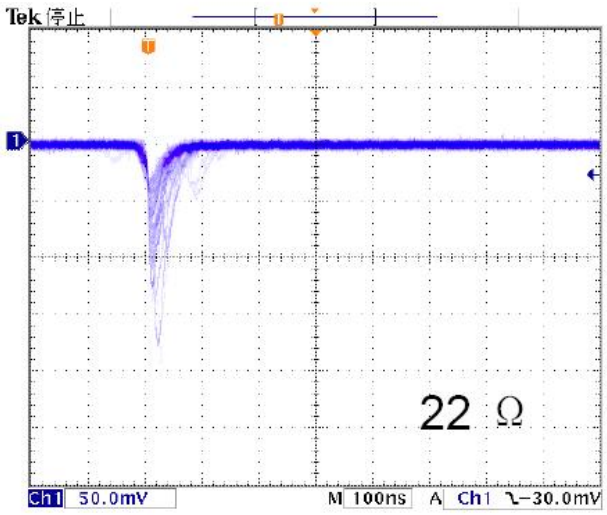

图 3. 14“Z”型读出条的 RPC 信号

图 3. 14 是“Z”型读出条在 22 Ω 终端匹配时读出的信号余辉图。信号的清晰度和幅度都较高，而且终端匹配效果非常理想，基本看不到信号在终端的反射。

* 这部分实验主要由关梦云和张清民完成

3.2.2 工作气体预研

BESIII 中使用的 RPC 气体比分为 Ar/R134a/Isobutane = 50/42/8。经过多次的实验和运行已经证明 RPC 在这个气体下的性能是稳定可靠的。效率坪区可以达到 600 V 以上；在坪区的效率也能达到 95%以上。由于大亚湾的实验室建在山洞里，在通风条件不理想的情况下，对气体安全性的要求就非常高。RPC 混合气体中的可燃性气体异丁烷比份过高，是我们比较担心的问题。根据普林斯顿大学陆昌国老师的分析，异丁烷在混合气体中的含量如果控制在 4%左右，安全性将大大提高。因此对工作气体预研的目的就是当异丁烷比份控制在 4%时，RPC 的性能能否保持。

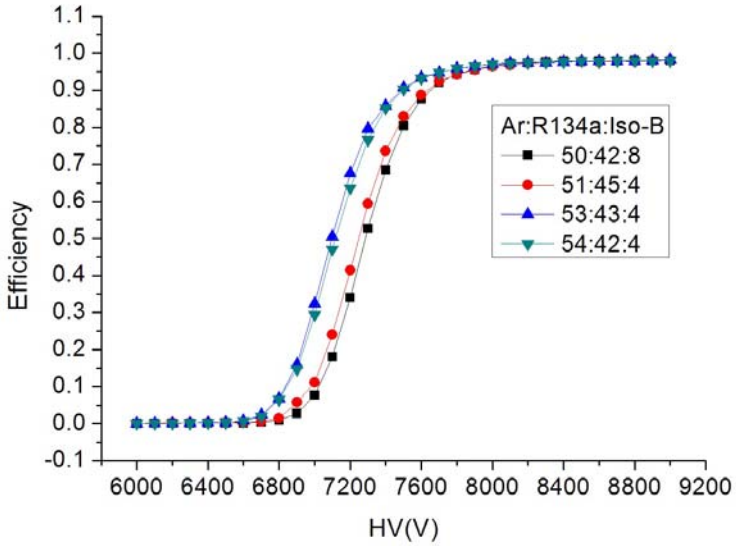

图 3. 15 异丁烷为 4%的混合气体与 BESIII 气体下 RPC 的效率曲线

图 3. 15 和图 3. 16 显示了异丁烷为 4%的几种混合气体和 BESIII 气体下 RPC 性能的比较，其中前者是效率曲线的比较，后者是噪声水平的比较。从图中可以看到异丁烷为 4%时，效率曲线和单计数率曲线的形状与 BESIII 非常相似，坪区的效率也几乎相同。因此可以确定 RPC 的工作气体中将异丁烷的比份降到 4%是完全可行的。因此我们在以后的 RPC 测试中都使用了 Ar/R134a/Isobutane = 53/43/4 的工作气体。在第六章中，将对 RPC 的工作气体作更加仔细的研究，以更好地发挥 RPC 的性能。

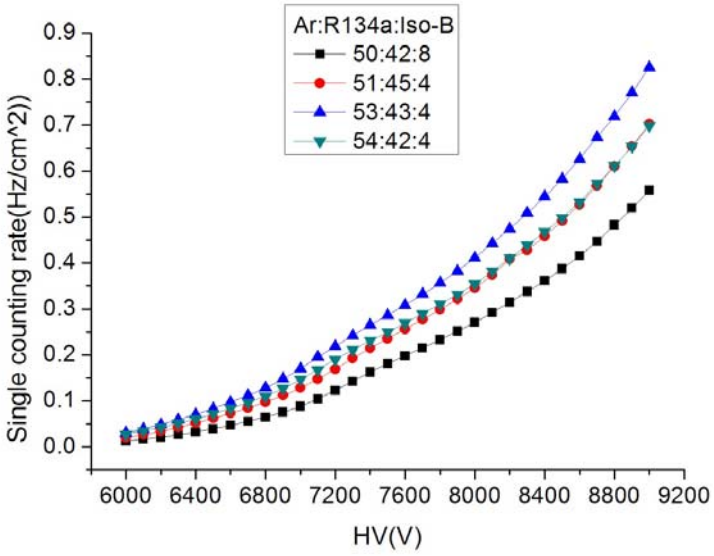

图 3. 16 异丁烷为 4%的混合气体与 BESIII 气体下 RPC 的单计数率曲线

3.2.3 RPC 模块*

为提高 μ 子鉴别的效率，大亚湾 RPC 被组装成模块的形式，每个 RPC 模块包含了四层 RPC 裸室。设每层 RPC 的探测效率为 ε，那么如果用 4 选 n 的触发逻辑（4 层中有 n 层同时有信号即触发，n≤4），在不考虑死区的情况下，模块对 μ 子的探测效率 E 可以用下式表示：

$$\mathrm{E}=\sum_{m=n}^{4} C_4^m \cdot \varepsilon^m \cdot (1-\varepsilon)^{(4-m)} \qquad (3.8)$$

当单层 RPC 效率为 95%时，若使用 4 选 3 的逻辑，RPC 模块的效率将达到 98.60%；若使用 4 选 2 的逻辑，则高达 99.95%（表 3. 1）。

表 3. 1 效率与 RPC 层数以及符合数的关系

Layer	≥1 criterion	≥2criterion	≥3criterion	≥4 criterion
1	95%			
2	99.75%	90.25%		
3	99.987%	99.275%	85.74%	
4	99.999%	**99.952%**	**98.598%**	81.45%

* 模块机械设计部分的工作主要由谢宇广、关梦云、付金煜、马晓妍等完成

3.2.3.1 模块结构*

一个 RPC 模块可以作为独立的探测单元，它集成了 RPC 探测器，感应信号读出条，前端电子学板（FEC）以及配套的供气供电线路。图 3. 17 是 RPC 模块内部结构的示意图（横截面）[33]。定义最上面的 RPC 裸室及读出条为 A 层，依次往下分别为 B、C 及 D 层。整个模块可以分为上下近似对称的两部分，中间由两层蜂窝板（实际装配中使用了阳光板）夹着一个接地屏蔽层分隔开来。以 A、B 层为例，A 层的正高压以及读出条的信号读出面（信号读出面总是放在 RPC 正高压面）朝上，负高压以及读出条的地层朝下。B 层则正好相反，负高压以及读出条的地层朝上，正高压以及读出条的信号读出面朝下。A 层和 B 层的读出条地层是公用的，这样的设计节省了一部分成本。A 层和 B 层的信号读出条方向是互相垂直的，分别为 Y 方向和 X 方向，这样设计的目的是为了分辨信号产生的位置。每个信号层或地层与其他介质接触的部分都使用了绝缘 PET 膜来保护和分隔。C、D 层的设计与 A、B 层基本相同不再赘述。

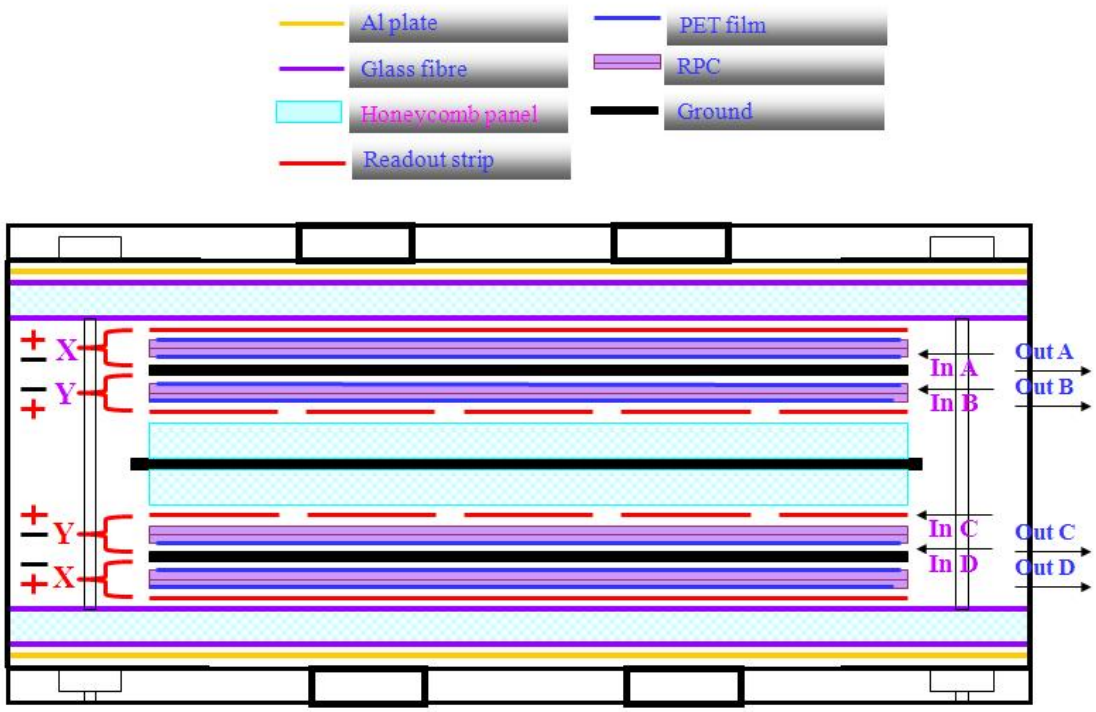

图 3. 17 RPC 模块内部结构示意图（横截面）

◆ RPC 裸室排布

模块内部的每层 RPC 都由一大一小两个 RPC 裸室拼接而成。小 RPC 的尺

* 模块机械结构的设计由谢宇广、关梦云、马晓妍等完成

寸是 1.0×2.1 m^2，大 RPC 的尺寸是 1.1×2.1 m^2。层与层之间，大小 RPC 的放置顺序是相反的。由于每个 RPC 在边缘部分存在约 1.2 cm 的探测死区，这样的放置方法把原本重叠的死区交错开来，保证每个区域至少有两层 RPC 可以进行有效的探测（图 3. 18）。

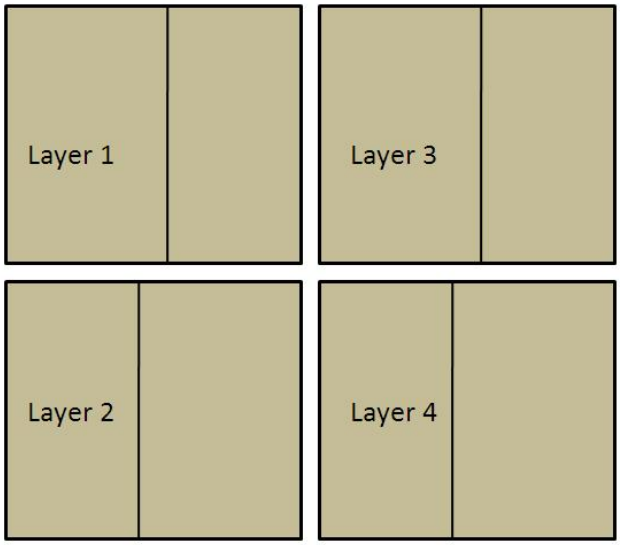

图 3. 18 模块内部各层 RPC 的摆放

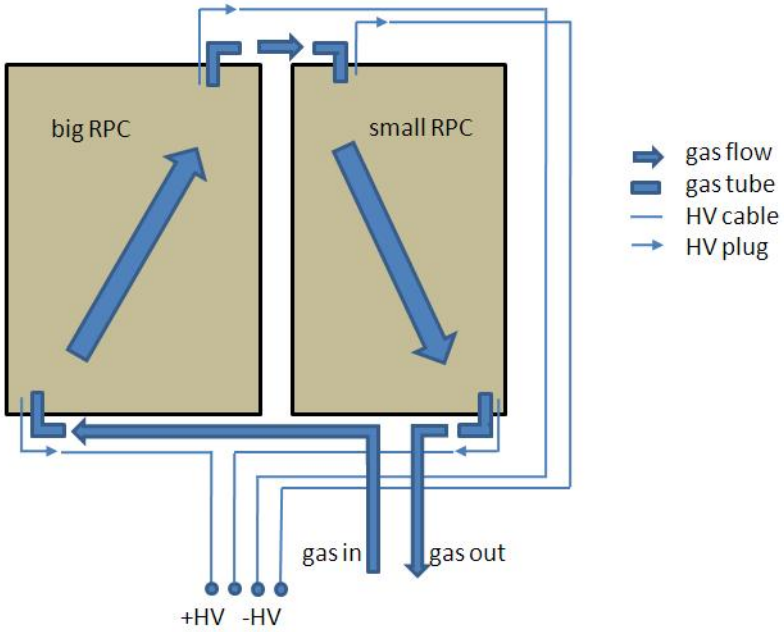

图 3. 19 RPC 模块内部单层 RPC 气管及高压的走线示意图

◆ 气管和高压线排布

在确定 RPC 的排布方法之后，就需要考虑气管和高压线的排布。RPC 连

接气管和高压的地方均在其两端的气嘴处。要保证气管和高压线的走线通顺流畅，方便供气供电，就需要合理设计气嘴以及高压插针的朝向。经过多次比较和优化之后，最终的气管和高压走线方式如图 3. 19 所示。同一层的两个 RPC，它们的气路通过连接一端的气嘴（在图中的上方）而连在一起，另两个气嘴分别作为气体的进气口和出气口集中设在模块的另一侧（在图中的下方）；在此侧还放置了高压分配盒，将正负高压分别供到模块的两侧，其中前面板侧（在图中下方）加正高压，后面板侧（在图中上方）加负高压。从图中可以看到，加正高压的插针，其附近气嘴孔总是朝着这块 RPC 的内侧；加负高压的插针，其附近气嘴孔总是朝着这块 RPC 的外侧。图中大的 RPC 其两个高压插针的方向都与气孔方向一致，我们把这样的 RPC 称作 A 型的 Big RPC（简称 AB 型）；图中小的 RPC 其两个高压插针都朝向本 RPC 的内侧，我们把这样的 RPC 称作 B 型的 Small RPC（简称 BS 型）。前面已经讲到，模块内部的各层 RPC 是大小交错的，图 3. 19 中大 RPC 在左边，小 RPC 在右边，那么其相邻层的 RPC 则是大的在右边，小的在左边。它们的气管和高压的走线方向基本相似，保证气管和高压的外部接口都集中在模块的一侧，方便集中供气供电。而此层所用的 RPC 型号则是 A 型的 Small RPC（简称 AS 型）和 B 型的 Big RPC（简称 BB 型）。这样，根据高压插针的不同方向以及尺寸的大小，RPC 一共有 AB、BB、AS、BS 四种型号，每个模块需要每种型号的 RPC 各两个。

3.2.4 模块电子学系统*

RPC 模块电子学系统的作用是收集 RPC 模块出来的信号并按照一定的要求进行处理和转换，最终送到数据获取（DAQ）系统。它主要由三层结构组成：前端电子学卡（FEC）、读出收发器（ROT）和读出模块（ROM）组成[34]。结构如图 3. 20 所示。FEC 与 RPC 模块装配在一起，一个 FEC 可以处理一个模块中 8 个 RPC 探测器的信号。一个 ROT 最多可以处理 15 个 FEC 的信号而一个 ROM 可以带 6 个 ROT。这样一个 ROM 最多可以处理 90 个 RPC 模块的信号，即大亚湾每个实验厅配置一个 ROM 即可。

* 电子学的设计开发工作由中科大负责完成

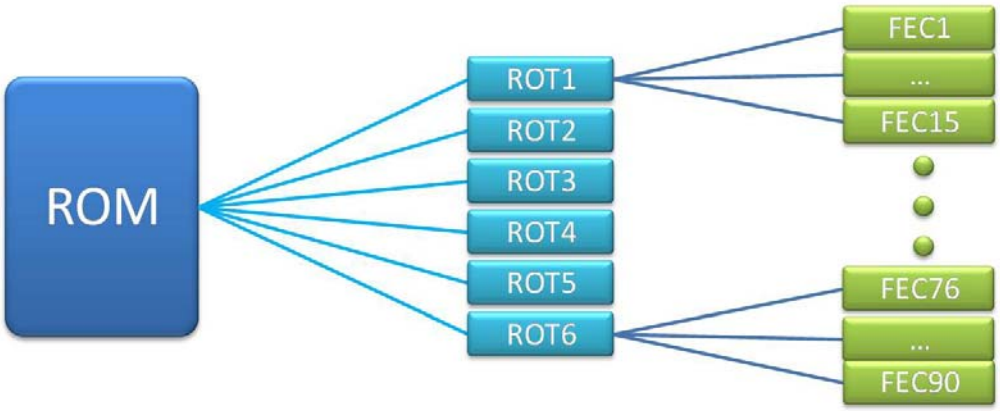

图 3. 20 RPC 模块电子学结构示意图

3.2.4.1 FEC

FEC 的作用是对 RPC 探测器出来的模拟信号进行甄别筛选，把模拟信号转换为数字逻辑信号，并在内部进行触发处理，决定数据的取舍。

整个 FEC 由插座接口、信号甄别筛选、数模转换器（DAC）和运算放大器、模拟开关、FPGA(Field Programmable Gate Array)、LDVS 转换收发等 6 大功能区域构成，其结构如图 3. 21 所示[35]。当 FEC 接收到 RPC 信号时首先将信号通过快速比较器判断信号是否过阈，然后将信号转换成数字脉冲送入 FPGA；自检模式下，可以采用模拟开关生成的伪随机信号代替 RPC 输入信号。甄别阈的设置是通过远程电路控制 FPGA 并利用 DAC 和运算放大模块进行电平转换来实现的。FPGA 是 FEC 的核心，它完成所有 FEC 的逻辑功能，如触发的判别，CrossTrigger 的处理，并行数据转换为串行数据，时钟的同步和绝对时间标记等。FPGA 生成的串行时钟和数据将通过 LVDS 转换模块发送到下一级的读出电子学中。

一个 FEC 处理一个 RPC 模块共四层 RPC 的信号。当有大于等于两层的 RPC 给出信号时，FEC 将产生一个四选二的本地触发；当有大于等于三层的 RPC 给出信号时，FEC 则产生一个四选三的本地触发。

3.2.4.2 ROT

ROT 的功能是接收来自 FEC 的数据和状态信号，将 LVDS 格式的信号转换为 TTL 信号并利用其中的 FPGA 模块将信号打包处理后传送给 ROM 和 VME RPC 触发模块（RTM）。其功能结构如图 3. 22 所示。ROT 传送给 ROM 和 RTM 的信号是经过电光转换后的光信号，通过光纤传播。

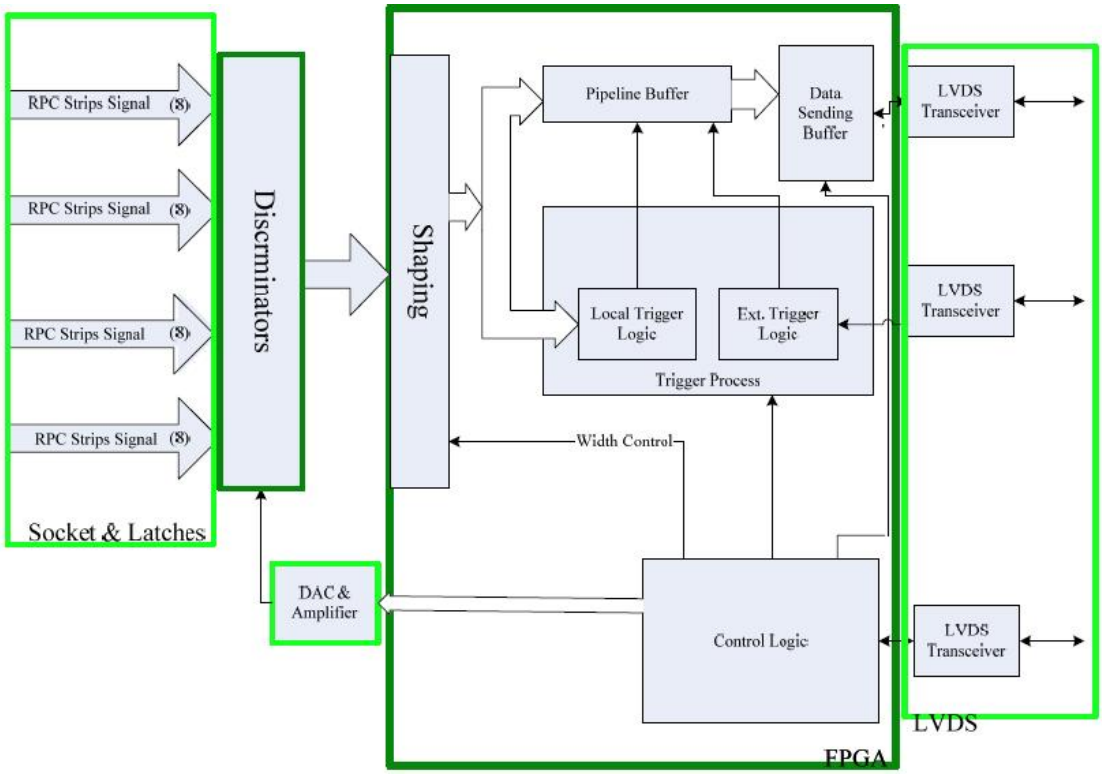

图 3. 21 FEC 的结构图

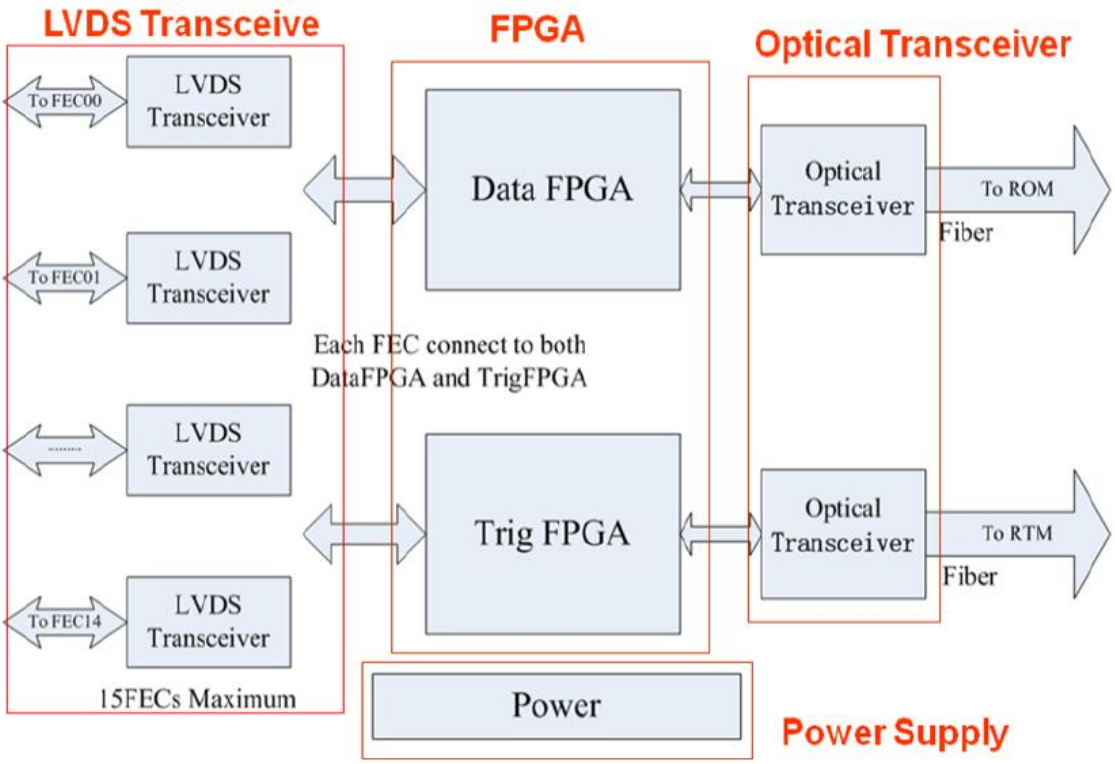

图 3. 22 ROT 结构图

3.2.4.3 ROM

ROM 是信号传送到 DAQ 系统之前的最后一站。它是一个 9U 的 VME 插件，包含了 6 个光学子模块，每个子模块收集和处理一个来自 ROT 的光信号。ROM 的功能是将 6 个 ROT 的光信号进行解码并进行排序，再打上时间标签后整合成一个数据串。当 DAQ 系统的 VME 总线提出访问请求时，就将数据发送出去。其数据处理的流程如图 3. 23 所示[34]。

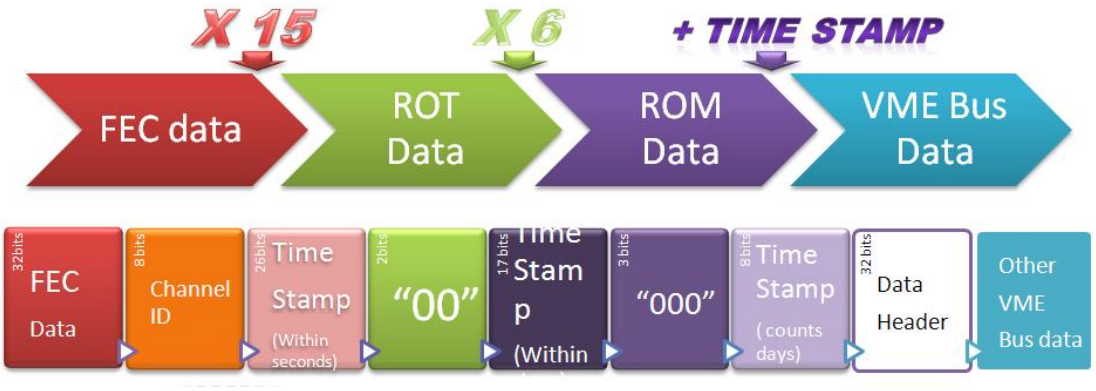

图 3. 23 ROM 数据处理流程图

3.3 本章小结

本章的内容可以分为两部分。第一部分介绍了 RPC 探测器的基本原理以及性能指标。第二部分讲述了 RPC 在大亚湾实验中的应用，介绍了大亚湾 RPC 的读出条研究情况、工作气体的预研、模块的设计以及电子学的基本情况。

第四章 RPC 的制作工艺和质量控制

2008 年 1 月开始，大亚湾 RPC 的批量生产逐渐展开。有了 BESIII 的经验积累以及针对大亚湾实验的前期研究，我们对生产性能优越的 RPC 有了更加充足的把握。本章将介绍大亚湾 RPC 的批量生产过程中的制作工艺以及质量控制中的各个重要环节*。

4.1 阻性板

阻性板的生产是 RPC 探测器制作和质量控制的第一个环节，也是最重要的环节之一。大亚湾 RPC 阻性板的主要材料是酚醛树脂，它主要由苯酚、甲醛和纸基构成，另外还需要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结构。阻性板有两项最重要的质量控制指标，表面光洁度和体电阻。它们对制作性能优越的 RPC 有着十分重要的意义。

4.1.1 加工生产

阻性板的生产在利盛木业有限公司进行。该公司位于河北省辛集市，是一家专业生产复合地板、耐火装饰板的公司。用于 RPC 的阻性板，工业上也叫电木板，实际上也是一种市场上较为常见的耐火板材，因此只要对原有的生产设备稍加改造即可投入阻性板的生产工作。阻性板的长宽分别为 2.3 m 和 1.2 m 左右，实际制成RPC时将会裁掉边缘多余的部分。阻性板的厚度将会影响RPC内部气隙的电场，因此是一个质量控制的指标之一，其尺寸为 2.0 ± 0.02 mm。阻性板的体电阻率可以通过调节原材料各成分的配比来实现比较粗略的范围控制。为保证阻性板表面的光滑度，在阻性板制作时使用了一种三聚氰胺薄膜，覆盖在阻性板的两侧表面，同时采用高光洁度的模版。覆膜后的阻性板，在避免涂油的前提下，光滑度得到大大改善（见第三章），对降低 RPC 的噪声是非常有利的。

4.1.2 体电阻率测试

生产好的阻性板首先运到高能所进行体电阻率的测试。

阻性板体电阻率的测试是通过一个半自动的测试机来实现的，如图 4. 1 所示。测试机自带一个约 2.3 m × 1.3m 的测试台用来放置阻性板，中间设有三对电极，每

* 此部分工作是在高能科迪公司以及高能所同仁的共同努力下完成的

对电极的其中一个电极是固定的，紧贴测试台；另一个活动电极正对着固定电极装在架子上。使活动电极接地，在固定电极上加载−4 kV 高压，当阻性板放入电极之间时，由空气压缩机的压缩空气驱动活动电极，使之紧紧压住阻性板。稳定保持 1 分钟后，用电流表读出此时的电流值（图 4. 2）。

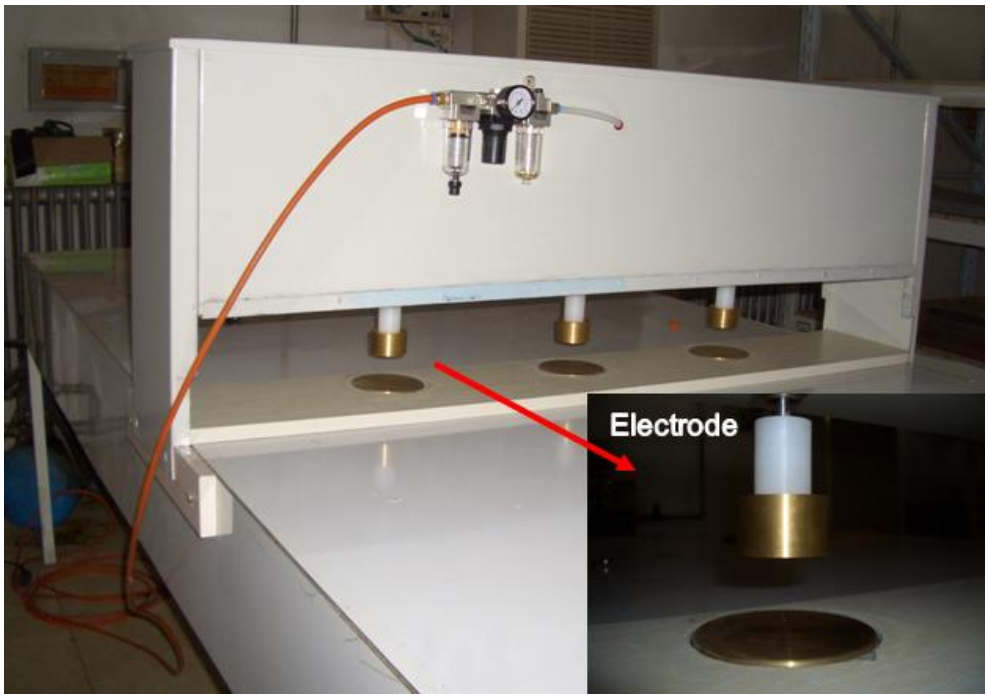

图 4. 1 阻性板体电阻率测试机

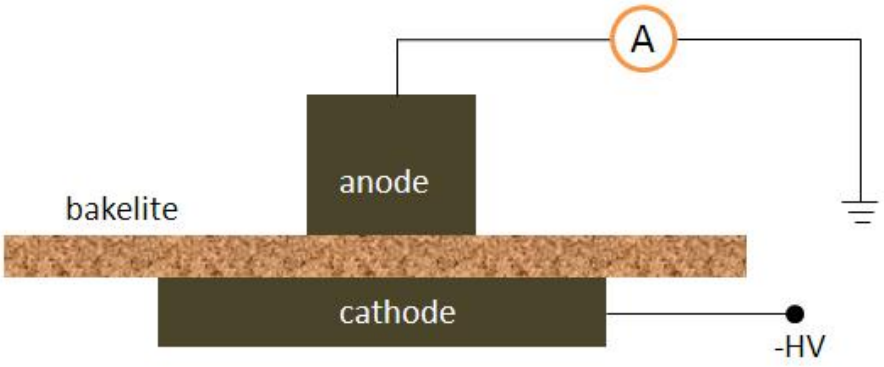

图 4. 2 阻性板体电阻率测试示意图

阻性板的体电阻率 ρ 可以通过下式来计算：

$$\rho = R \times \frac{S}{d} = \frac{V}{I} \times \frac{S}{d} \qquad (4.1)$$

其中 S 是电极的有效接触面积，d 是阻性板的厚度。测试机每次可以同时测三个点，每块阻性板测三次共 9 个大致均匀分布的点。

阻性板的体电阻率跟温度有密切的关系如图 4. 3 所示。因此在测量体电阻之前，每块阻性板都要放在室温中至少 24 小时以上。在测体电阻的时候，记录测试时候的温度，并按下式换算到 20℃时的标准体电阻率：

$$\rho_{20} = \rho_t 10^{0.06(t-20)} \qquad (4.2)$$

其中 t 是测试时的温度，ρ_t 是温度为 t 时的体电阻率。0.06 是根据实验结果拟合后的近似参数。

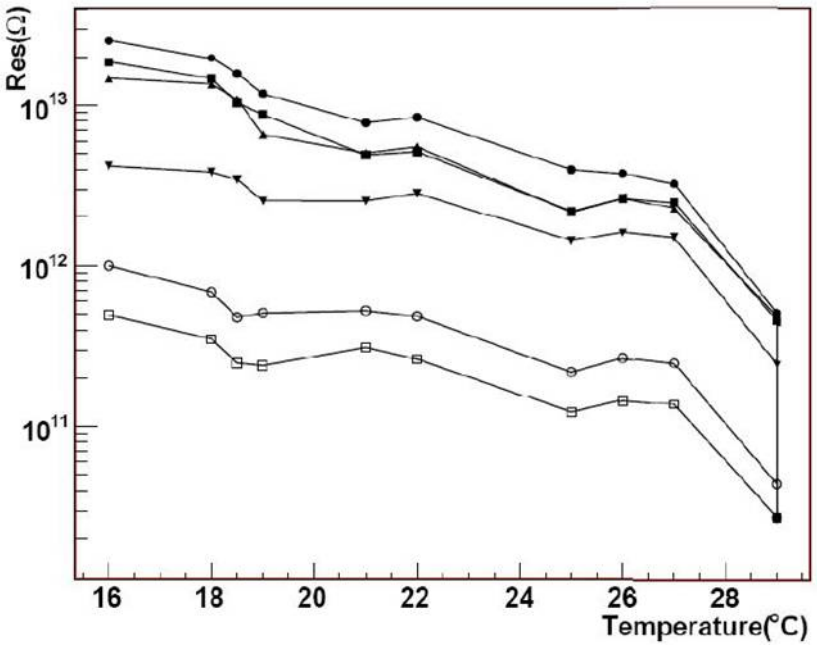

图 4. 3 阻性板体电阻率随温度的变化

为了使阻性板制成 RPC 后，性能更加稳定一致，我们对阻性板的体电阻率范围进行了严格的控制。规定在 20℃时，9 个测试点的体电阻率必须在 0.5 – 2.5 × 10^{12}Ωcm 的范围之内，否则将弃之不用。

图 4. 4 显示了所有阻性板 9 个测试点的平均体电阻率在 20℃时的统计分布。有的阻性板由于各种原因，进行了两次或两次以上的体电阻率测试。考虑到阻性板长期暴露在空气中时，随着空气湿度的变化，其内部的水分子含量也会发生改变，进而使体电阻率产生改变。所以对这些阻性板进行统计时都取最后一次的测试结果为准。所测的共计 3600 多张阻性板，它们在 20℃时的平均体电阻率约为

$1.3 \times 10^{12}\Omega$cm。其中约有 10%的阻性板平均体电阻率在 $0.5 – 2.5 \times 10^{12}\Omega$cm 的范围之外。扣除这些阻性板后，剩下的平均体电阻率约为 $1.35 \times 10^{12}\Omega$cm。图 4. 5 是阻性板各个测试点的最高最低体电阻率之差的统计分布。差值平均值为 $0.26 \times 10^{12}\Omega$cm，约为平均体电阻率的 20%，说明各个点的体电阻率相差不大，整张阻性板的体电阻率的均匀性较好。

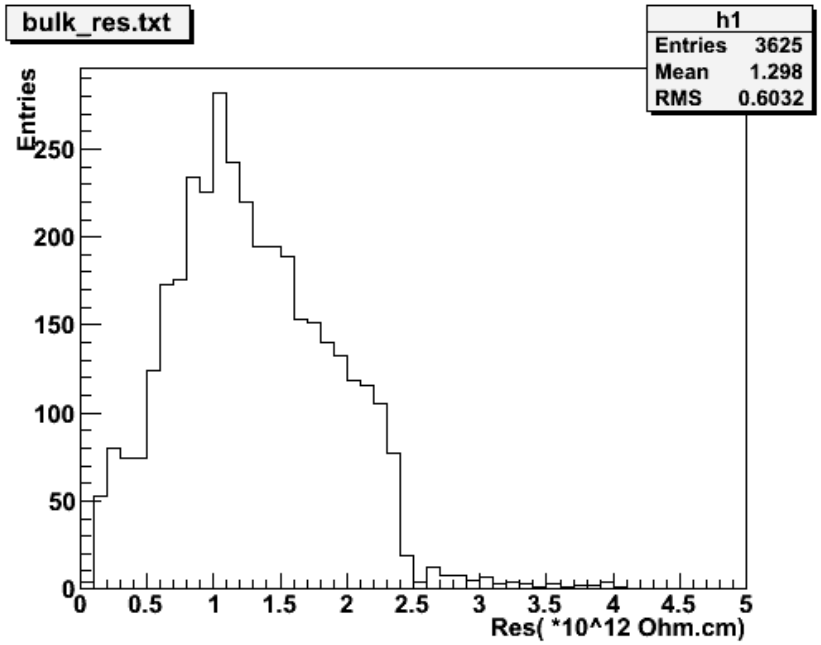

图 4. 4 阻性板 20℃平均体电阻率的统计分布

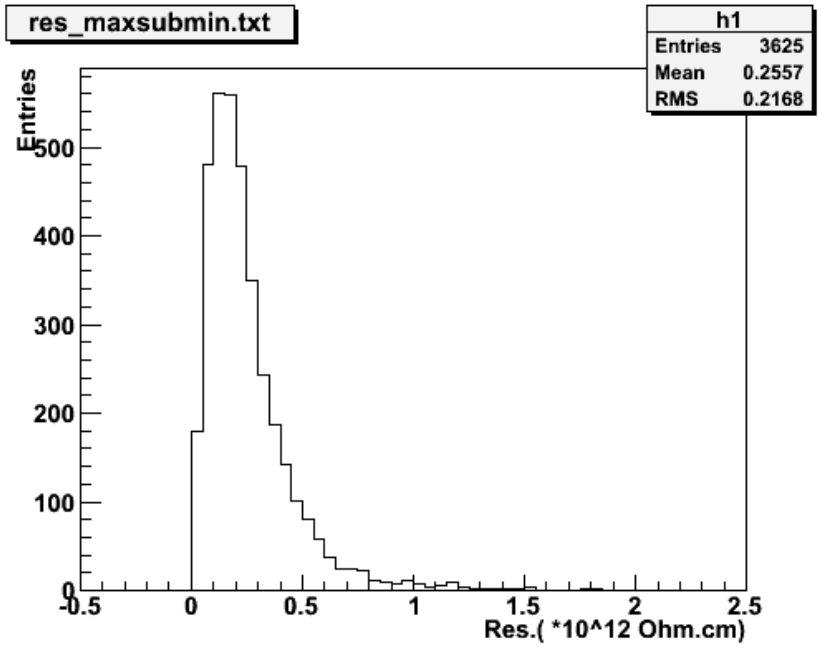

图 4. 5 阻性板各测试点最大最小体电阻率之差的统计分布

图 4. 6 阻性板裁切机

4.1.3 裁切

体电阻率测试合格的阻性板会被运往高能科迪公司制作 RPC 探测器。制造之前的第一道工序是将阻性板裁切成 1.1 m ×2.1 m 和 1.0 m × 2.1 m 的标准尺寸分别用于制作两种不同型号的 RPC。

阻性板的裁切在一个特制的裁切机（图 4. 6）上进行，其配置的定位梢可以将裁切的尺寸误差控制在 0.1%以内。裁切时总是两块阻性板同时裁切，保证它们的尺寸完全一致，将来用到同一块 RPC 上去。

4.1.4 表面处理与面电阻率测试

阻性板作为 RPC 的电极，在制成探测器之前，其一侧表面需要喷上一层石墨，用来分配加载在上面的高压。石墨层的喷涂利用的是市场上常见的喷漆枪（图 4. 7），通过熟练的技术工人手工喷涂而成。喷涂之前要求用酒精仔细擦洗阻性板上的脏物和灰尘，喷涂要求仔细均匀。喷完石墨的阻性板将在空气中暴露 24 小时左右，使石墨溶液中的溶剂充分蒸发，然后进行石墨层面电阻率的测量。如果当时测得的值较大的话，阻性板将继续在空气中风干，直到其降至 1000 kΩ/□以下为止。

面电阻率是石墨层的一个重要参数，它在数值上等于正方形材料两边的两个电极间的表面电阻，且与该正方形大小无关。因此面电阻率的测试用一个装有正方形电极的万用表（图 4. 8）就能实现。每块阻性板测试两个点的面电阻率，其平均

值要求在 400 – 1000 kΩ/□的范围之内。图 4. 9 显示的是最后制成 RPC 探测器的阻性板平均面电阻率的统计分布。从图中可以看到，阻性板面电阻率的平均值为 821 kΩ/□。有很大一部分阻性板的体电阻率为 1000 kΩ/□，这其中的大部分是首次测量值过大，继续风干一段时间后重测的结果。

图 4. 7 典型的喷漆枪

图 4. 8 面电阻率测量设备

在阻性板喷石墨层的一角需要贴一个宽 1 cm、长约 10 cm 的导电铜皮胶带作为引出，准备将来与高压连接。然后在阻性板喷涂石墨的那一面上利用覆膜机覆上一层 100 μm 厚的绝缘 PET 膜。PET 膜与石墨层接触的一面是带有热熔胶的，在覆膜机的加热加压下可以与阻性板及石墨层紧密地粘接在一起。在覆膜的过程中必须保证阻性板表面的清洁以防将固体小颗粒带进去。图 4. 10 是技术工人正在操作覆膜机对阻性板进行覆膜。

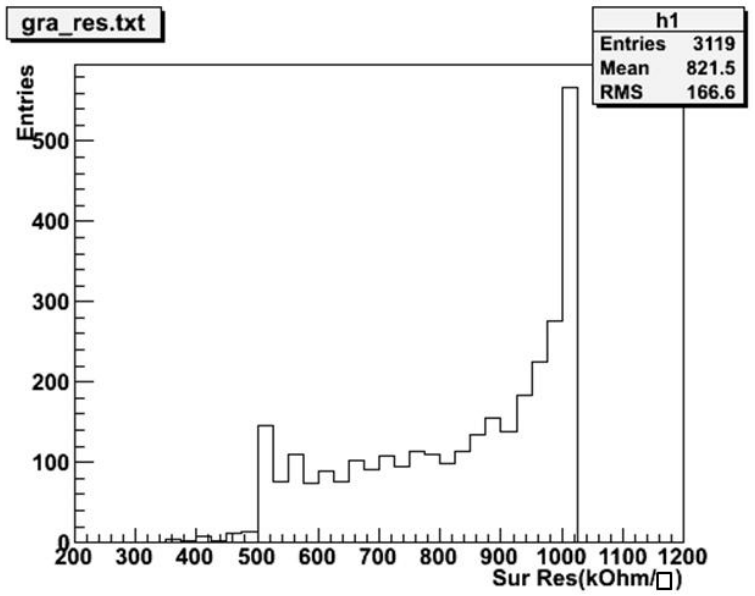

图 4. 9 阻性板面平均电阻率的统计分布

图 4. 10 正在覆膜的阻性板

4.2 RPC 裸室制作与检漏

阻性板准备好之后，需经过酒精仔细清洁然后移入 RPC 装配专用的清洁间。先将阻性板的喷石墨层朝下，平放在清洁间的专用平台上，用酒精再次清洁阻性板的表面。在阻性板表面上每间隔约 10 cm，点上适量的环氧胶，然后放上塑料垫片（spacer）。垫片的作用是维持 RPC 中两块阻性板电极之间的距离，以保证 RPC 内部场强的均匀。垫片直径约 12 mm，厚度与 RPC 的气隙厚度一致，为 2 mm。考虑到垫片与阻性板之间环氧胶的厚度，所以在厚度方向上做成了 0.02mm 的负公差。阻性板的四周涂胶后放置宽度约 10 mm，厚度 2 mm（同样也是 0.02 mm 的负公差）的塑料边条。其作用是密封整个 RPC 室体。在阻性板两个窄边靠近边缘处还要各放置一个塑料气嘴，将来用来给 RPC 供气。两个气嘴的方向呈对角线，并且位置与导电铜皮一致，因为连接高压的插针也将安置在气嘴上。垫片和边条的上方也同样涂上适量的环氧胶，然后将另一块经过清洗的阻性板扣上，对齐各个边，然后在各个边缘再次涂上环氧胶仔细密封。这样一个完整的 RPC 裸室就基本制成了。

制成的 RPC 首先要固化内部的环氧胶，以达到良好的粘接效果。期间需要对 RPC 施加一定的压力，这通常有两种做法。一是在 RPC 上面放置钢板等重物，二是对 RPC 内部抽真空，利用大气压来压紧两块阻性板。在 RPC 制成后 48 小时，里面的环氧胶已经得到了充分的固化。接下来就要对 RPC 的密封新进行检验，即检漏。

检漏的方法是将 RPC 的一端气嘴与储水 U 型管相连，从另一端气嘴打入空气。在打入空气的过程中，U 型管的水面将发生变化，形成液面差。当液面差达到 30 cm 时，另一端停止打气并密封保持 30 分钟。观察 U 型管液面的变化，如果 RPC 密封不好，存在漏气的现象，U 型管的液面差将会逐渐变小。如果在 30 分钟之内，液面差降低在 2 mm 之内，那么可以认为此 RPC 的密封性是符合要求的；反之将在 RPC 边缘部分重新补胶，并重新检漏。

4.3 高压插针的制作

经过检漏合格后的 RPC 会被贴上印有唯一编号的标签，然后送往高能所。出厂时的 RPC 在两端气嘴附近留有从石墨层引出的导电铜带，这就是预留加高压的地方。

需要焊接在铜带上的是一种特制的高压插针。它是由两部分构成的：铜质管状的针身和镀银针头（后改为镀金针头，更易于焊接），如图 4. 11 所示。在制作时要先将铜管与针头用酒精擦拭干净。铜管与针头焊接端的孔内也需要进行清洁。焊接铜管与针头时需要预先将焊锡丝装入铜管内部，以保证焊接强度。

制作好的插针通过气嘴处预留的槽进行固定，然后与 RPC 的导电铜带进行焊接，焊接后再涂上 DP190 结构胶进行固定。待 12 小时后胶基本凝固，加高压检查其接触质量。图 4. 12 是制作完成的高压头照片。

根据在 RPC 模块中的不同位置，RPC 的高压插针有两种焊接方向。一种是两个插针都与气嘴的气孔方向一致，称之为 A 型。另一种是两个插针都朝向 RPC 内侧，称之为 B 型（在第三章图 3. 19 中有更直观的展示）。

图 4. 11RPC 的高压插针与针头

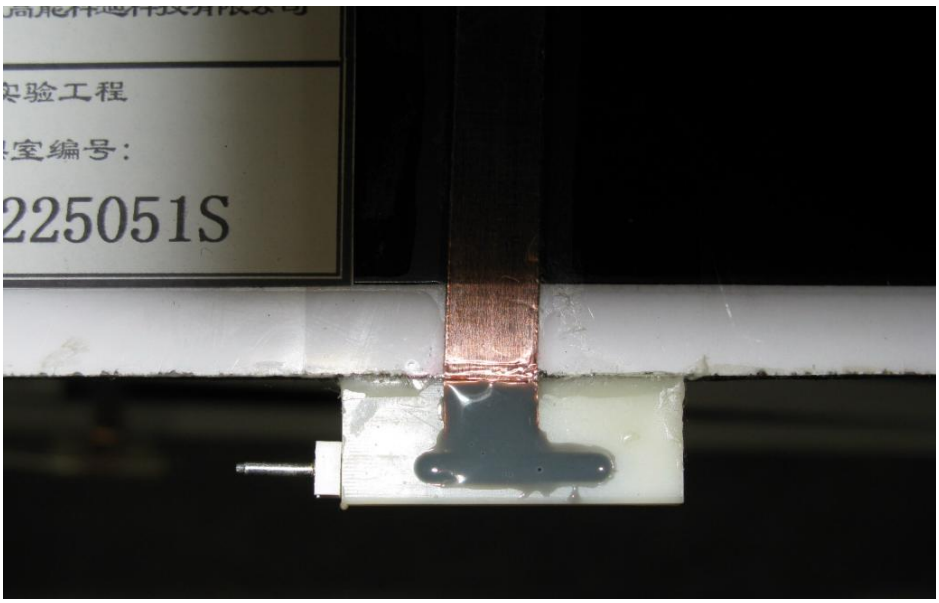

图 4. 12 制作好的 RPC 高压头

4.4 Training

刚刚制作好的 RPC，其性能往往是比较差的。原因是在制作过程中不可避免的会在阻性板的内表面留下灰尘。这会使 RPC 的噪声和暗电流都非常大，而效率则非常低。所以在 RPC 投入宇宙线测试之前必须先对 RPC 进行纯 Ar 条件下的 training（又叫老化或者老炼）。

RPC 的 training 在高能所进行。在 training 之前，RPC 被整齐地摆放在架子上并进行预换气，一般是 8 块 RPC 串联同时换气。通入的纯 Ar 气体流量一般控制在 100 sccm 左右。假设每块 RPC 内部的体积为 4.5 L，则 8 块 RPC 的体积共 36 L。在通气 12 个小时之后，总通气量达到 72 L，可以保证每块 RPC 都至少换了两遍气体。进过充分换气后的 RPC 被加上高达 10000 V 的高压（正 4000 V，负 6000 V），并保持一定的时间，这就是 training 的过程。在 RPC training 的过程中，由于没有淬灭性气体的参与，内部的电流会变得非常大，甚至会超过高压插件的最大允许电流（一般是 1 mA），这时候就不得不适当降低所加的高压值。

Training 所用的供电设备是 CEAN 公司生产的 SY127 高压机箱及其配套插件。其高压控制插件可以通过 RS232 接口连接到计算机，并用计算机的超级终端实现控制。这样就可以在计算机上控制并显示所加的高压值以及返回的电流值，如图 4. 13 所示。

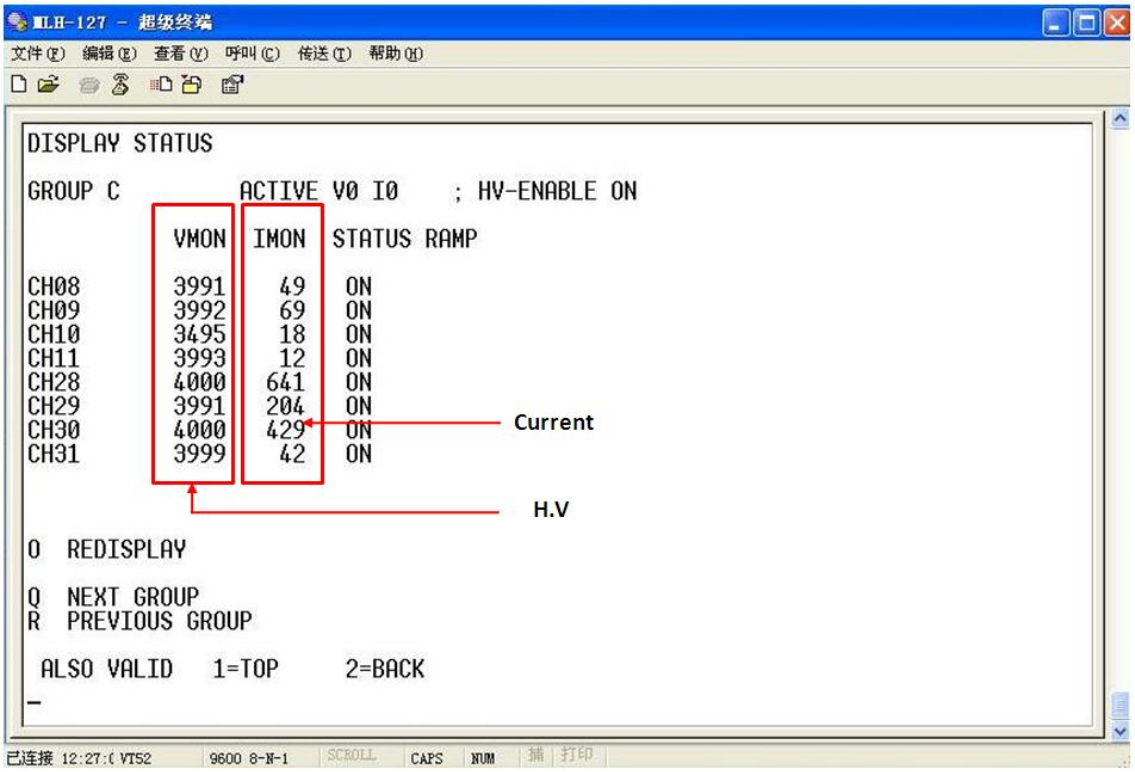

图 4. 13 利用超级终端控制并显示 SY127 高压及电流信息

4.4.1 Training 时间

图 4. 14 显示的是 training 时间较长的 RPC 在 training 过程中的电流随时间的变化趋势。它们的 training 是同时进行的（一般同时 training 8 块 RPC，图中画出了其中 7 块，另一块在期间发生了高压 trip，故舍去），因此数据记录点的时间是一致的。在 training 时加的高压是 10000 V，温度在 18 度左右。从图中可以发现，RPC 在加高压 training 的过程中，电流会经历一个先上升后下降的过程。在前半段的上升过程中，RPC 内部的灰尘和毛刺比较多，放电现象比较严重。内部频繁的放电使阻性板的温度逐渐上升，体电阻率逐渐下降，因而使得电流逐渐上升。在后半程中，RPC 内部的灰尘和毛刺已经在电流的作用下燃烧得越来越少，放电效应减弱，电流也下降了。在图 4. 14 中，上升的过程经历了约 30 个小时，此后便开始下降。在 training 52 个小时后，电流已经基本稳定。所以综合考虑 training 效果和实验进度，一般对 RPC 进行两天两夜的 training。在 training 时需要每间隔 2 个小时左右记录高压、电流值以及温度、湿度、大气压等环境参数，保存在数据文件里，以及时观察 RPC 的变化。图 4. 15 显示的是 training 操作时长的统计分布图，平均 training 时间达到了 53 小时。每次 training 操作一般对 8 块 RPC 同时进行，所以图中的统计数乘以 8 大约等于 RPC 的数量。

从图 4. 14 中还可以看到，不同 RPC 的电流大小相差是比较大的。在同样的高压作用下，最小的几块 RPC 平均电流不到 200 μA，而最大的达到了近 600 μA，这也间接反映了阻性板体电阻率的差异。

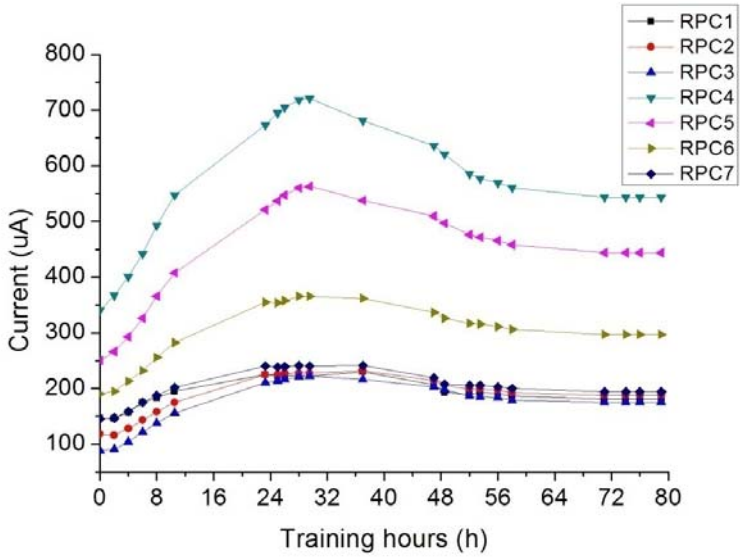

图 4. 14 RPC 在 training 时电流随时间的变化

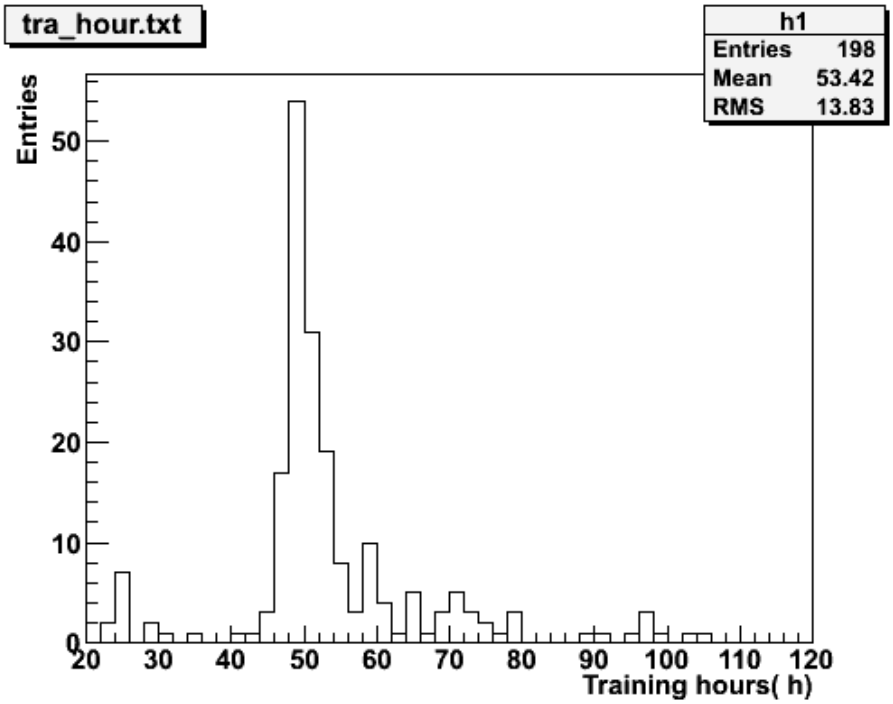

图 4. 15 RPC Training 操作的时长分布图。一般每次同时 training 8 块 RPC

4.4.2 Training 效果

由于未经 training 的 RPC 噪声非常大，放电非常强烈，我们无法对其进行宇宙线测试，否则电子学设备将非常容易损坏。因此我们无法对 training 前后的 RPC 性能作数据上的对比。但是我们对有些 RPC 做了两次 training，通过比较第二次 training（re-training）前后的 RPC 性能可以管窥 training 过程所体现的作用。

图 4. 16 图 4. 17 图 4. 18 分别是二次 training 前后 RPC 的效率单计数率以及暗电流曲线的对比。从图中很明显地能够看到 RPC 的效率有了提高，而单计数率和暗电流都显著降低。当然，由于这是一个低效率的 RPC（90%左右，这也是选择它进行二次 training 的原因），所以才能比较明显地看到效率的提升。对于大部分正常的 RPC，第一次 training 已经起到了非常良好的效果，再次 training 能够适当地改善噪声和暗电流但不会使效率再次提升。

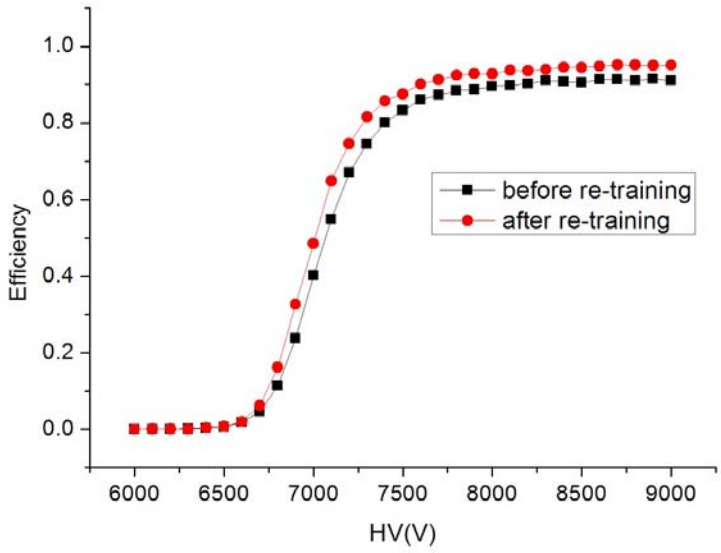

图 4. 16 二次 training 前后 RPC 效率曲线的比较

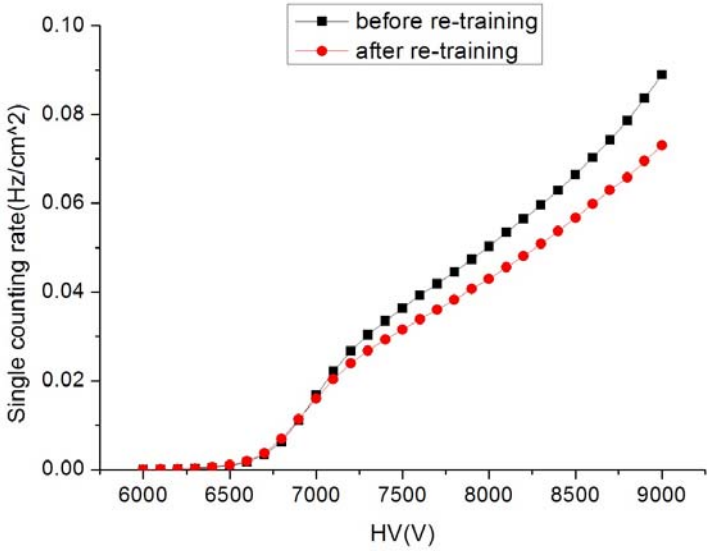

图 4. 17 二次 training 前后 RPC 单计数率曲线的比较

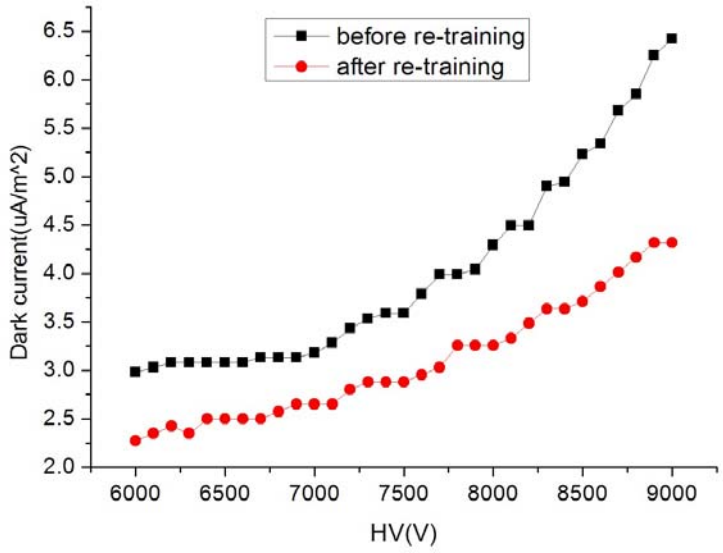

图 4. 18 二次 training 前后 RPC 暗电流曲线的比较

4.4.3 体电阻率估算

RPC 在纯 Ar 气 training 的过程中，如果假设内部的气隙可以认为是近似导通的，那么根据已知的高压和电流值就可以（4.1）式算出此时阻性板的电阻以及两块阻性板的平均体电阻率 ρ'。然后再根据（4.2）式换算到 20℃时的体电阻率 ρ'_{20}，如果将此值与阻性板体电阻率测试环节得到的 ρ_{20} 相比较，两者应该是接近的。

图 4. 19 显示的是 $\Delta = \rho_{20} - \rho'_{20}$ 的统计分布。其中 ρ_{20} 是根据 RPC training 结束

时的数据计算而得的，有一部分 training 时没有记录温度值的 RPC 没有统计在内。ρ'_{20}和ρ'_{20}都取了两块阻性板的平均值。从图中可知，两者的误差 Δ 基本呈一个高斯分布，平均值为 $0.17 \times 10^{12}\Omega$cm。也就是说根据 training 电流计算而得的体电阻率比实测值要略高，幅度约为阻性板平均体电阻率的 13%。这是可以理解的，因为在我们的近似中，忽略了气隙的导通电压。所以实际加在阻性板上的有效高压值应该是扣除气隙上压降的值。忽略的结果导致阻性板上的电压 U 被高估了，那么电阻和体电阻率也高估了，实际值应该更低。

图 4. 20 显示的是 training 中的 5 块 RPC，调节高压后电流随高压的变化趋势。从图中可知，5 块 RPC 的电流都与所加的电压直线相关，直线的斜率就是阻性板的电阻的倒数。而如果将这些实验点构成的直线延长，与 X 轴相交（此时电流为 0），得到的高压值可以近似认为是气隙的导通电压。

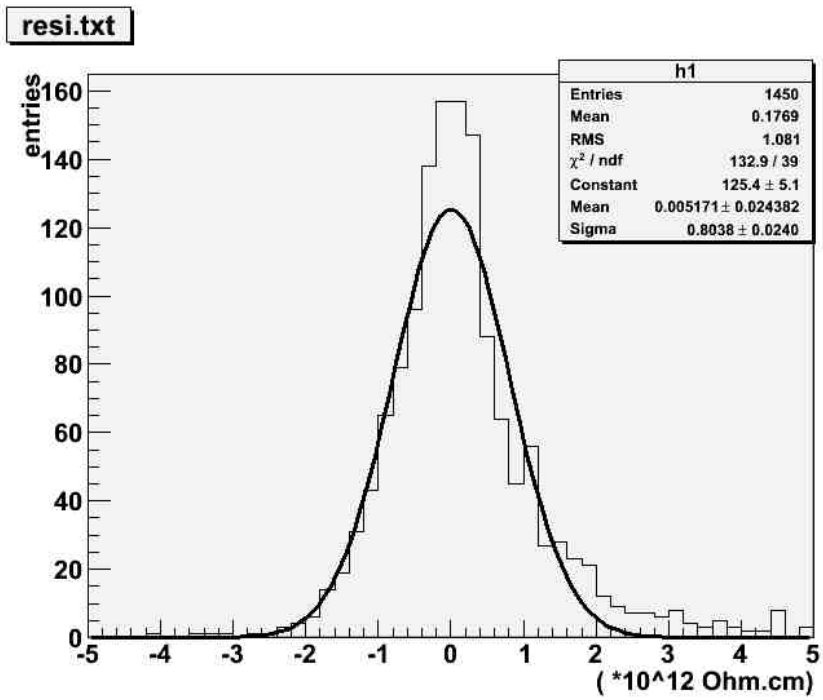

图 4. 19 根据 training 估算的体电阻率与实测值之差值的分布图

如果改变实验温度，阻性板的体电阻率也将发生变化。我们在 3 个不同的温度下重复了图 4. 20 的实验，并根据电流随电压的变化关系分别计算出了这 3 个温度下阻性板的平均体电阻率。图 4. 21 是体电阻率（对数坐标）与温度的关系。从图中可以发现，体电阻率的对数与温度基本成直线关系，直线斜率为 - 0.058±0.03，这跟我们在（4.2）式中所用的常数 0.06 符合得很好。这也验证了两种测量阻性板体电阻率方法的一致性。

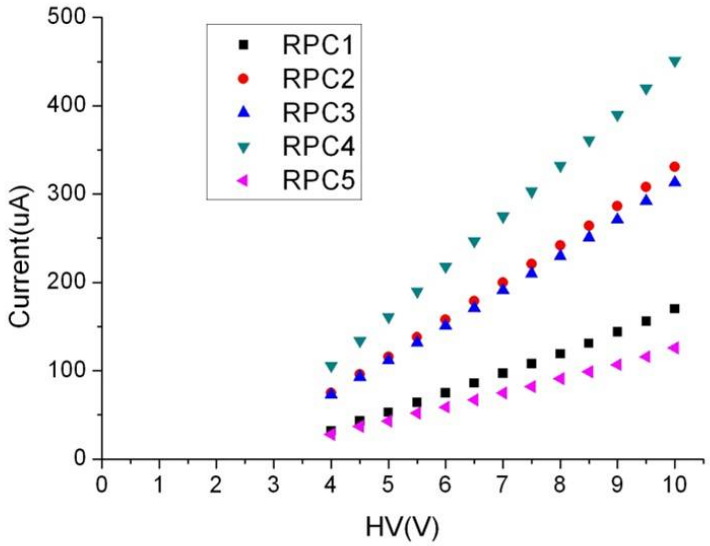

图 4. 20 Training 条件下，RPC 电流随高压的变化

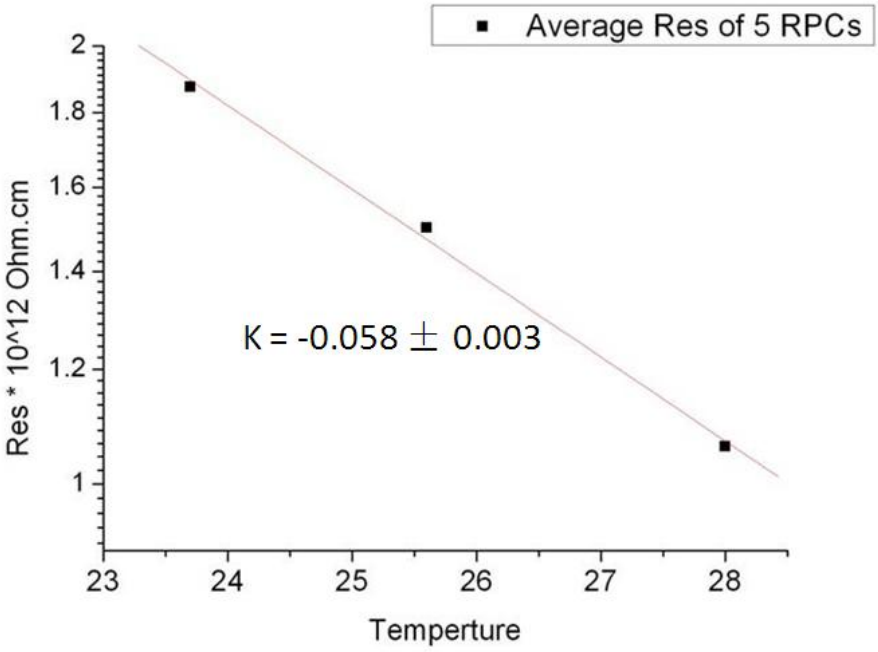

图 4. 21 阻性板体电阻率与温度的变化关系

4.5 本章小结

本章随着 RPC 的生产过程介绍了 RPC 制作中的主要工艺和质量控制的要点。阻性板从生产开始，要经历体电阻率控制，裁切、喷石墨、测面电阻、覆 PET 膜等工序，期间需要做好尺寸误差控制、板面清洁等工作，特别是两个参数：体电

阻率和面电阻率的测量。阻性板的体电阻率控制范围是 $0.5 – 2.5 \times 10^{12}\Omega$cm。最终使用的阻性板的平均体电阻率为 $1.35\times 10^{12}\Omega$cm。阻性板石墨层的面电阻率要求的控制范围是 400 - 1000 kΩ/□，最后实际使用的阻性板平均面电阻率为 821 kΩ/□。RPC 的制作要经历室体粘合和加压固化等阶段，并需要经过 30 cm 水柱压力下的检漏。最后的完成品在高能所进行高压 training。经过 training 的 RPC，性能将得到大大的提高。

第五章 大亚湾 RPC 的宇宙线测试

所谓宇宙射线，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。由于其能量大又无处不在，宇宙线在粒子探测器领域发挥着重要的作用。宇宙线测试是研究 RPC 探测器的重要实验手段，也是 RPC 裸室生产之后必经的质量检验过程。本章将介绍大亚湾 RPC 探测器的宇宙线测试流程，测试方法以及测试结果的分析。

5.1 测试系统与设置

一套可靠的测试系统是保证探测器测试结果质量的基础。RPC 探测器的测试系统主要包括气体、信号读出、Trigger 系统、电子学、数据获取等几个子系统。测试系统的原理图如图 5. 1 所示。下面将对各子系统进行逐一介绍。

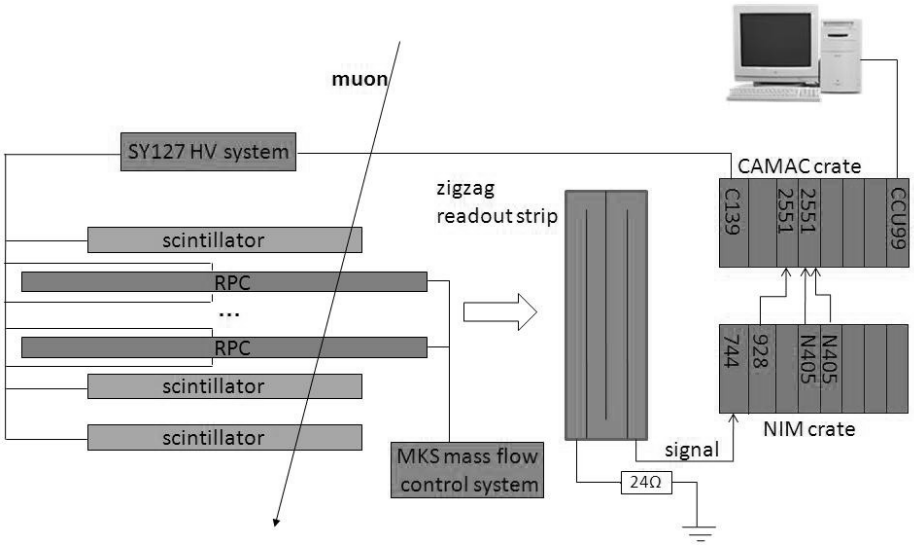

图 5. 1. RPC 探测器的宇宙线测试系统示意图

5.1.1 气体系统

RPC 探测器的工作气体是氩气（Ar）、氟利昂（$C_2H_2F_4$）、异丁烷（i-C_4H_8）三者的混合气体。根据对 RPC 工作气体预研的结果，我们降低了 Isobutane 在混合气体中的比例，采用了 Ar/R134a/Isobutane = 53/43/4 的混合气体。实验所用的配气设备是 MKS 公司的质量流控制器（Mass Flow Controller，MFC）如图 5. 2 所示。

图 5. 2 KMS 公司的气体质量流控制器

在实际的应用中我们发现由于仪器老化等原因，调节气体比分时存在着较大的误差。因此我们还采用了“皂沫流量计”来检验各路气体的流量。“皂沫流量计”的主体部分是一根带有刻度的玻璃管，底部较细呈“T”型。“皂沫流量计”的底部细管插入肥皂水袋中，底部“T”型管的另一口与气管相接。当通气时，轻捏肥皂水袋，使液面稍稍高过“T”型管分岔口，在气流的作用下，将会形成肥皂泡。松开水袋使液面回落，肥皂泡将在刻度管内张开并在气流的作用下沿着刻度管上升。记录肥皂泡经过 V_1 和 V_2 的时间差 ΔT，即可得到气体的流量 ρ：

$$\rho = \frac{V_2 - V_1}{\Delta T} \tag{5.1}$$

上面两种方法的结合可以确保气体比分的准确性，在长期的测试过程中，还需要定期检查、标定气体比分，来纠正环境改变造成的比分漂移。

5.1.2 信号读出

首先简单回顾一下 RPC 探测器信号的产生过程。RPC 探测器的工作原理建立在粒子与介质的相互作用以及气体的电离放电机制的基础上。当快速带电粒子穿过 RPC 探测器的灵敏气隙层时，与气体分子（Ar）发生非弹性碰撞，气体分子获得能量，发生电离和激发效应，形成了初级电子-离子对，即初级电离。初级电子离子（主要是电子）在高压电场的作用下将继续运动。如果电场强度足够大，初级电子在电场中获得足够的能量能继续与气体分子碰撞并产生电离和激发。这个过程不断持续就形成雪崩效应。而雪崩信号进一步发展，就会形成流光信号。

不论是雪崩信号还是流光信号，都会在相应的阻性板电极区域导致电场的变化，从而感生出正负电荷。正电极为负电荷，负电极为正电荷。这些电荷经过一层绝缘 PET 膜再感应到铺在 RPC 探测器表面的金属读出条上形成可以探测的信号。测试中使用的读出条与将来在大亚湾正式运行所用的读出条一致，其外部尺寸为 105 cm × 210 cm，在纵向划分为四道读出，每道宽度约为 26 cm。每道读出条内部还有“Z”字型的结构，如图 5. 3 所示。 “Z”字型的设计使得每道读出条等效于宽度 6.5 cm，长度 8.4 m。这样的设计能使 RPC 探测器信号宽度更窄，幅度更高。每道读出条的终端用 24 Ω 的电阻接地，使传到终端的电荷通过电阻释放，以免产生反射再次被读出端读出。关于读出条以及匹配电阻的内容，在第三章有更详细的讲述。

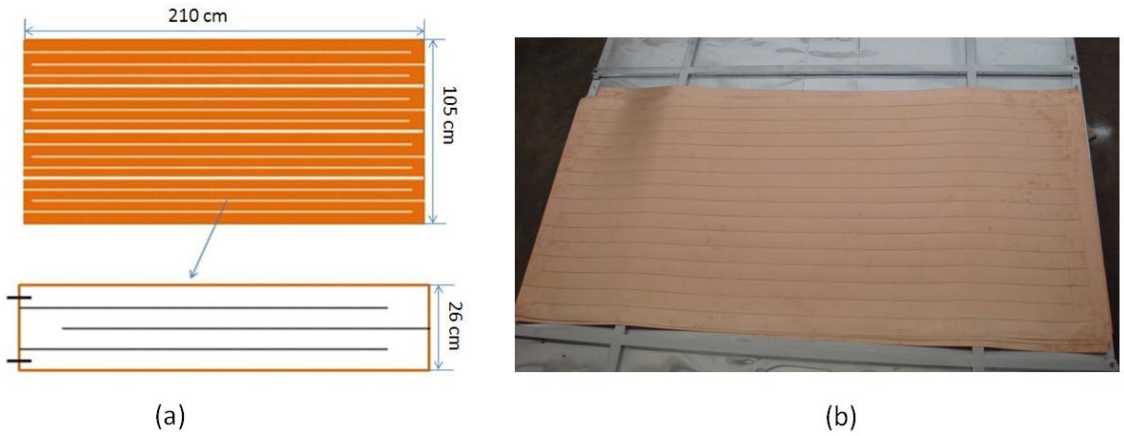

图 5. 3 RPC 探测器的读出条示意图(a)以及实物图(b)

5.1.3 Trigger 系统

Trigger 系统由 3 块 1 m × 1 m 的塑料闪烁体构成，其中两块放在测试架的底部，一块放在测试架的顶部，如图 5. 4 放在塑料闪烁体之间的是待测的 RPC 探测器，其几何尺寸为 1 m × 2.1 m 和 1.1 m × 2.1 m 两种，所以可以保证穿过三个闪烁体的宇宙线 μ 子必穿过 RPC 探测器。塑料闪烁体属于有机闪烁体，有机闪烁体主要是一些芳香族化合物，如苯、蒽、二苯基多烯烃类等，它们受激发射的荧光波长在 350 ~ 500 nm 之间，发光时间约 $3 \sim 5\times10^{-9}$ s。塑料闪烁体把闪烁溶质溶在塑料单体中进行热聚合加工而成，易于制成各种形状的探测器并且体积也可以做得很大。当高能宇宙线 μ 子穿过闪烁体时，与有机分子发生碰撞损失能量，使有机分子的 π 电子产生激发。这些处于激发态的分子群会按照一定的寿命跃迁回基态

同时发出光子。塑料闪烁体探测器通过光纤与光电倍增管(PMT)相连。闪烁体射来的光子打到光电倍增管的光阴极时，发生光电效应产生光电子。光电子经过电子光学系统聚焦输入到光电倍增管的打拿极(dynode)。每个光电子在打拿极上打出几个电子，这些电子又射向第二个打拿极，又分别打出若干个电子，形成一连串的电子倍增过程。经过十几次倍增后全部电子被光电倍增管的阳极吸收形成最终的电流信号。

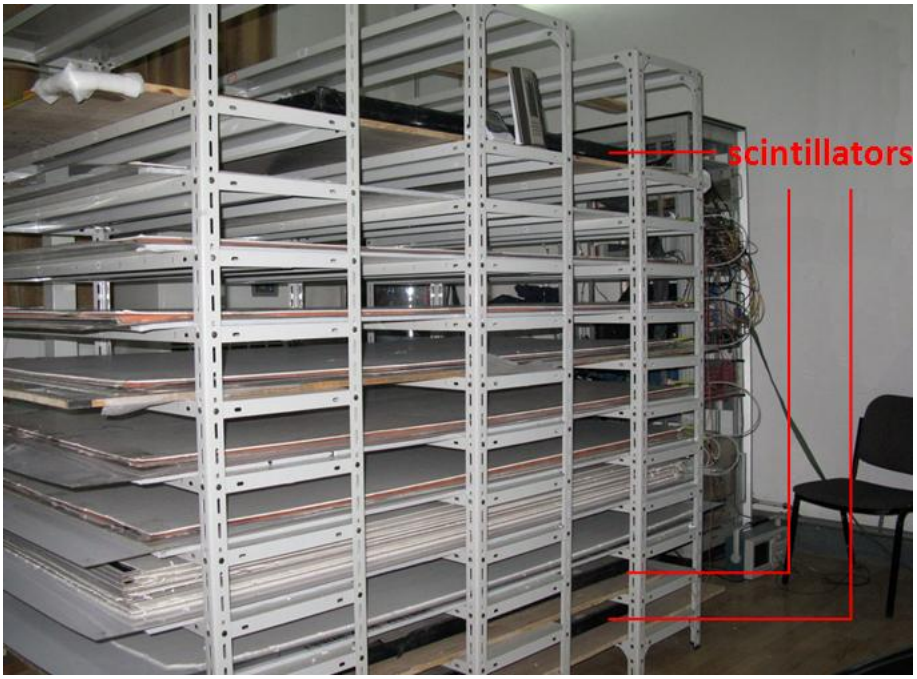

图 5. 4 Trigger 系统。三块塑料闪烁体探测器作为 Trigger 望远镜

5.1.4 电子学系统

电子学系统的任务是处理从 RPC 探测器和光电倍增管输出的电流模拟信号，使之转换成数字逻辑信号并且按测试要求作逻辑与或运算，最终得到我们需要的测试结果。电子学系统的逻辑如图 5. 5 所示。光电倍增管与 RPC 的四道模拟信号首先必须经过甄别器(Discriminator)，转换为数字逻辑信号。甄别器的有两个重要的设置参数：甄别阈以及信号输出宽度。合适的甄别阈设置能排除小幅的噪声而不至于影响真实信号，在这里 RPC 和 PMT 的甄别阈分别设置为 50 mV 和 15 mV。甄别器的输出宽度是指输入的模拟信号幅度超过预设的甄别阈后甄别器输出的数字逻辑信号的宽度。输出宽度必须与输入信号的宽度相匹配，例如 RPC 信号幅度和宽度都比较大，而且个别信号还存在反射现象，因此输出宽度就必须设置得大

一点，以免一个宇宙线事例产生 2 个甚至多个信号输出。在这里 RPC 和 PMT 信号的甄别输出宽度分别设置为 160 ns 和 20 ns。由于一块 RPC 由 4 路读出条读出信号，任意一路读出条有信号都代表 RPC 探测器产生了信号，所以这 4 路信号首先作逻辑“或”运算合并为整体，代表整个 RPC 探测器的信号输出，并送往 CAMAC 计数器插件。这就是 RPC 探测器的单计数。三个光电倍增管经甄别后的数字逻辑信号作“与”运算，并输出到 CAMAC 计数器插件。这就是三重符合计数。此三重符合信号再与整个 RPC 探测器的信号相“与”后即得到该 RPC 探测器的四重符合信号，同样送到 CAMAC 的计数器插件。

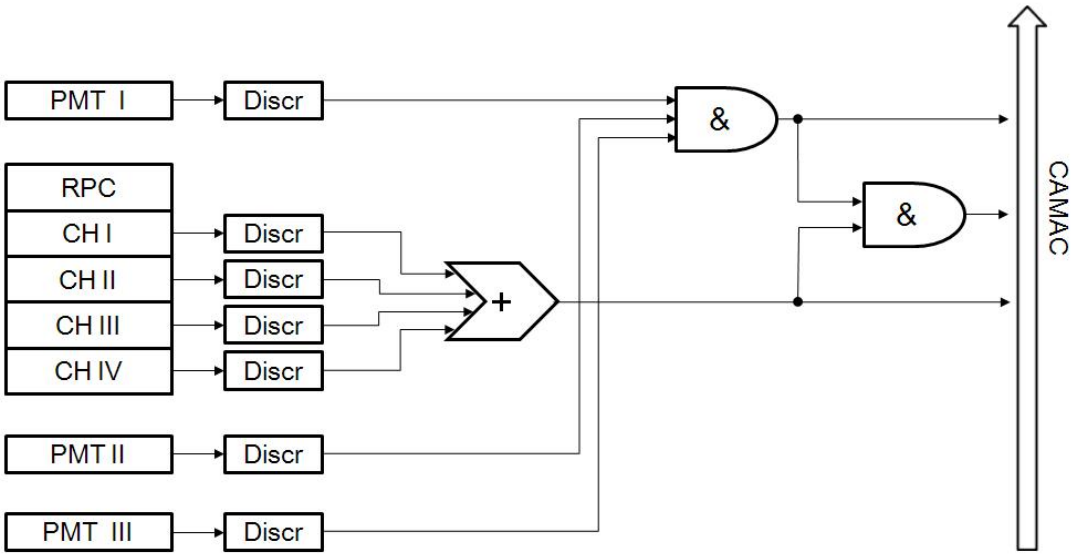

图 5. 5 RPC 探测器宇宙线测试系统电子学逻辑示意图

5.1.5 数据获取

测试系统所用的数据获取软件是基于 ROOT 开发的，运行在 Linux 平台。此软件主要分成三个模块：高压控制模块、数据获取模块和用户界面及图形显示模块。高压控制模块通过与 CEAN SY127 高压机箱的控制插件的通讯，控制 RPC 探测器的供给高压使之在预设范围内作高压扫描，实现高压设定的自动化。在上一节已经提到电子学处理后的信号最终将输出到 CAMAC 的计数器插件。数据获取模块通过对 CAMAC 控制插件的访问，读取计数器测试数据并按一定的格式存入数据文件。RPC 暗电流数据则从高压机箱得到，也存入数据文件。用户界面及图形显示模块提供一个交互式界面，用来设置测试参数如高压扫描范围、步长、持续时间，RPC 编号、面积等。在测试过程中，此模块还能把测试数据自动填图并显示，使用户能够实时的掌握测试的进度和结果。

5.2 测试流程与进度

由于大亚湾所用的 RPC 探测器数量较多（共计 1500 余个，实际生产的更多），测试工作量大，时间跨度长，因此优化测试流程，合理安排测试时间，对于保证工程进度同时尽量减轻工作人员负担有着重要意义。

表 5. 1 RPC 探测器宇宙线测试流程表

工作时间	工作任务
09:00 – 09:30	取下测试完的 RPC，换上已换气的 RPC，连接气管高压准备测试
09:30 – 10:00	将已 training RPC 放入测试间并开始换气; 稳定测试间温度
10:00 – 10:30	将待 training 的 RPC 放入 training 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 RPC 信号后，开始宇宙线测试
11:00 – 16:00	宇宙线测试
16:00 – 16:30	取下测试完的 RPC，换上已换气的 RPC，连接气管高压准备测试
16:30 – 17:00	将完成 training 的 RPC 放入测试间并开始换气; 稳定测试间温度
17:00 – 17:30	待测试间温度稳定，加高压检查 RPC 信号后，开始宇宙线测试
17:30 – 22:30	宇宙线测试
22:30 – 23:00	结束测试，关闭高压与气体系统，备份实验数据

在 RPC 探测器的宇宙线测试之前，还需要做一些准备工作，包括高压头的制作（两面），纯 Ar 条件下的 training 以及测试前的预换气。RPC 的正负高压分别加在探测器的两面，在两端由贴在石墨层上的导电铜胶带引出并与专用的插针焊接，作为高压头。插针的制作以及焊接等工作由专门的实验师完成。Training 系统可以同时供给 16 块 RPC 共计 32 路高压，平均每天可以完成 8 块 RPC 的 training，一周可以完成 8×7=56 块。每个工作日的大致测试时间表如表 5. 1 所示。宇宙线测试系统一天可以完成两批 RPC 的测试，最多每批可以测 6 块，这样一周（5 个工作日）最多可以完成 6×2×5 = 60 块 RPC 的测试，与 training 的进度基本匹配。实际测试中，由于各方面的原因一般是达不到最快的进度的，而且也不需要。RPC 的测试进度只需要满足下面一道工序 — RPC 模块的装配的进度要求即可。RPC 的批量测试从 08 年 6 月份开始，到 09 年 10 月份完成首批约 1600 块的测试。

5.3 测试结果

在测试过程中，RPC 的高压从 6000 V 到 9000 V 之间以 100 V 的步长进行扫描，在每个高压点上保持的时间设定为 100 s，共进行至少 5 次循环。PMT 的高压则固定为 2050V 不变。三个闪烁体的触发率约为 20 Hz，所以 RPC 经过 5 轮的高压扫描之后，可以达到 10000 个左右的事例。假设 RPC 的效率为 0.95，那么所测得的效率的统计误差为 $[0.95\times(1-0.95)/10000]^{1/2}\approx 0.2\%$。宇宙线测试记录的 RPC 探测器参数是效率、单计数率和暗电流。同时需要记录的是测试时候的环境温湿度以及大气压。RPC 测试间的温度控制在 20±2℃。湿度没有专门进行控制，因为 RPC 表面覆了 PET 膜，环境湿度对 RPC 的影响较小。根据实验记录统计，大部分测试时间的湿度在 33±10%的范围之内。在分析测试结果之前，先需要讲述一下 RPC 的工作高压的选取。

5.3.1 工作高压的合理范围与最佳值

最佳工作高压的概念是为了兼顾 RPC 效率和噪声水平而提出来的。当工作气体为 Ar/R134a/Isobutane = 53/43/4 时，RPC 通常在高压升到 7600 – 7800 V 的时候达到 95%的效率。高压继续升高时，RPC 的效率上升非常缓慢，到大约 8600 – 8900 V 时，效率达到最高（97%左右）。而单计数率和暗电流一般在高压升到 8200 – 8400 V 时开始急剧的上升。

合理选择 RPC 的工作高压应该遵循这样一个原则：既使 RPC 达到较高的效率又避免过高的单计数率和暗电流。这样从上面的数据可以得出，RPC 的合理工作高压应该在 7800 – 8200V 之间。在第三章 3.1.3 节中已经讲到，RPC 的性能跟气体的温度和气压密切相关。当温度和气压发生改变时，RPC 的工作高压就会发生偏移。因此我们定义在标准环境条件下（温度 20℃，大气压 1010 mbar）的最佳工作高压取在合理工作高压范围的中点，即 8000 V。这时的 RPC 能够最大限度地承受运行环境改变以及 RPC 个体差异带来的影响。图 5. 6、图 5. 7、图 5. 8 显示的分别是标准环境条件下，RPC 的效率、单计数率和暗电流曲线。

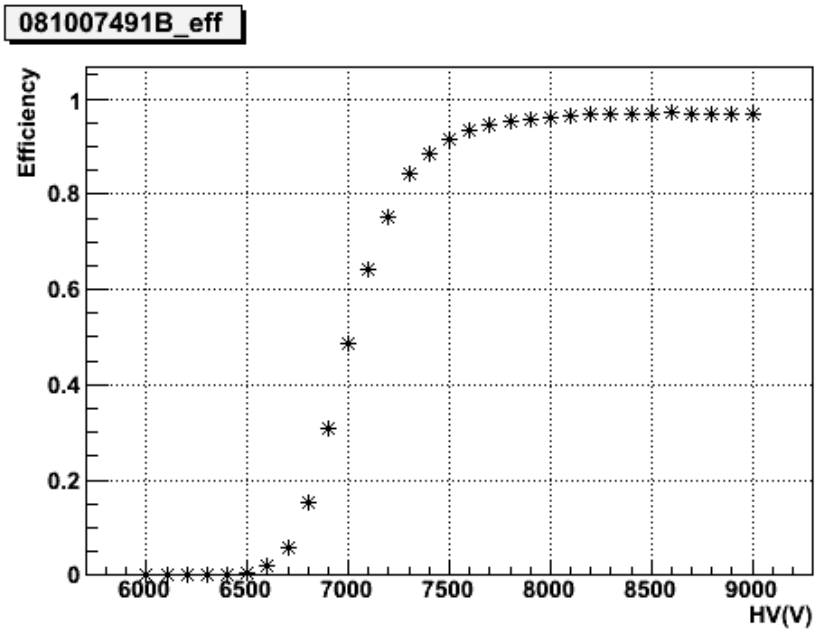

图 5. 6 标准环境（T=293K，P=1010 mbar）下的 RPC 的效率曲线

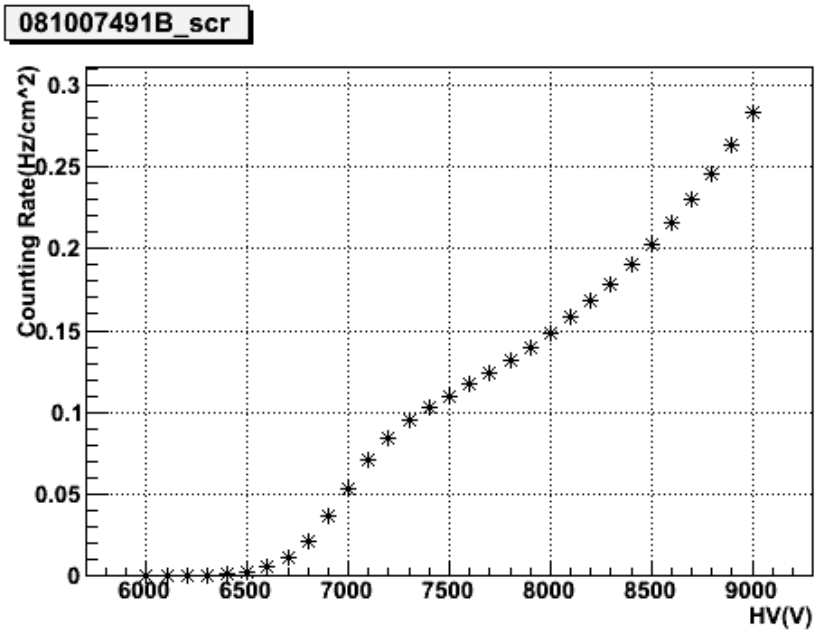

图 5. 7 标准环境（T=293K，P=1010 mbar）下的 RPC 的单计数率曲线

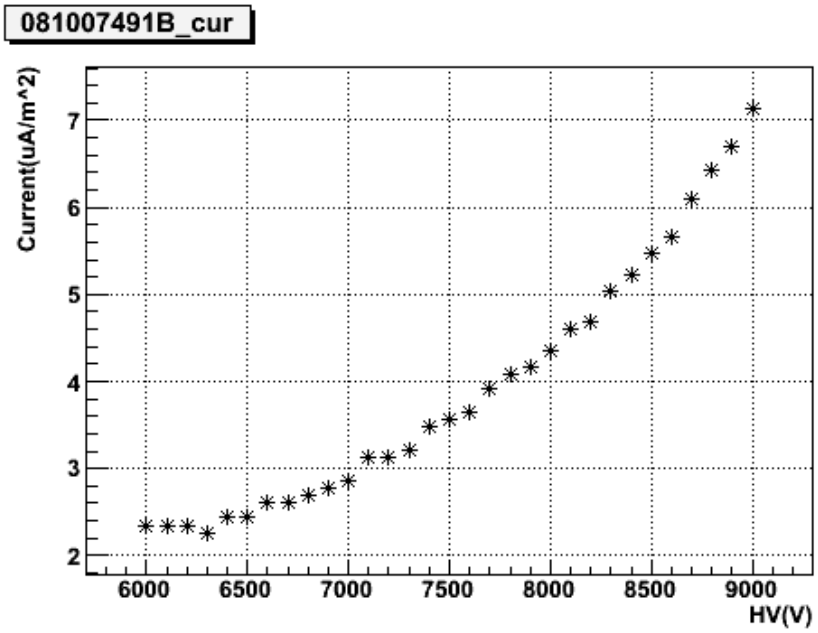

图 5. 8 标准环境（T=293K，P=1010 mbar）下的 RPC 的暗电流曲线

5.3.2 效率

探测效率是 RPC 的一个重要性能参数，也是质量控制的重要指标之一。大亚湾实验要求 RPC 效率达到 95%以上。

5.3.2.1 统计分布

图 5. 9 显示的是第一批测试的 1581 个 RPC 在 8000 V 高压下所测得的效率统计分布。RPC 的平均效率达到了 95.3 %，其中 1256 个 RPC 效率高于 95 %，占总数的 79.4%。如果扣除效率低于 90 %的 RPC（62 个，平均效率 83.6%，属于在制作过程中有重大失误），则平均效率达到 95.7 %。效率小于 94 %的 RPC 有 171 个，占总数的 10.8%，它们将不会使用在大亚湾实验上。另有 154 个（9.7%）的 RPC 效率介于 94%到 95%之间。由于 RPC 在大亚湾应用时将被组装成模块的形式，而一个模块包含 4 层 RPC 裸室。为了节省成本，一部分效率在 94%到 95%之间的 RPC 仍将被装配在 RPC 模块里面，与之搭配的是效率高于 96%的 RPC，这样可以使它们的平均效率能够达到 95%以上。假设使用所有 94%以上的 RPC，那么大亚湾 RPC 的平均效率将达到 96.0%。

RPC 批量测试的时间跨度很长，虽然在测试过程中的温度基本恒定，但大气压的变化是无法控制的。如果考虑温度和气压的影响，则应该根据（5.2）式将每个 RPC 的加载高压刻度到标准环境（T_0 = 293 K，P_0 = 1010 mb）下[39]。

$$V = V_a \times (P_0 / P) \times (T / T_0) \qquad (5.2)$$

这里 V_a 取 8000 V，是在标准环境（T_0，P_0）下的最佳工作高压，V 为实际测试环境（T，P）下的最佳工作高压。

图 5. 10 显示的是换算到标准环境下的 8000 V 工作高压时，RPC 的效率统计分布。这时 RPC 的平均效率为 95.5%，比没有换算之前略有上升。而效率高于 95%的 RPC 从原来的 79.4%上升到了 79.8%；效率高于 94%的 RPC 从原来的 89.2%上升到了 89.7%。

在实际的测试工作中，我们为了操作方便（另一方面也没有充分估计到环境改变对 RPC 工作高压的影响），所以判断 RPC 效率是否合格时，依据的是测试所得的 8000 V 效率（即图 5. 9 的结果），并没有作换算。

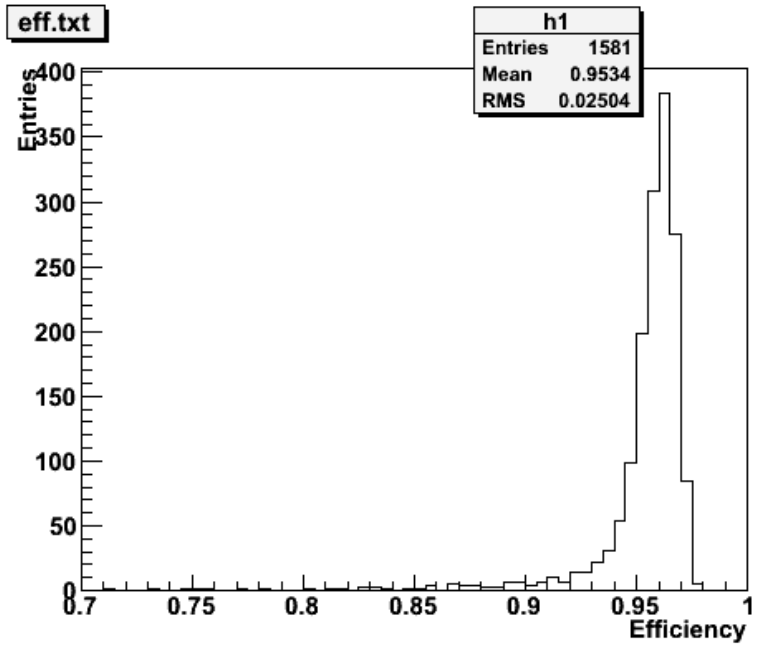

图 5. 9 测试环境下 RPC 在 8000 V 高压时的效率统计分布

5.3.2.2 最高效率

除了 RPC 在最佳工作高压下的效率之外，我们还关心 RPC 能达到的最高效率是多少。图 5. 11 就是我们所测得的 RPC 最高效率的统计分布。约 67%的 RPC 最高效率在 96.5%以上；40%的 RPC 最高效率在 97%以上，只有 5.8%的 RPC 最高效率低于 95%。图 5. 12 是达到最高效率的高压分布图。由于我们测试的范围是 6000V 到 9000 V，因此没有 9000 V 后面的数据。从图中可以看到，在 9000 V 达到最高效率的 RPC 数量最多，这意味着如果高压继续升高 RPC 效率还有升高的可能。当

RPC 效率上坪之后，特别是高压升到 8500V 以上时，各个高压点上测得的 RPC 效率相差非常小，在统计误差的范围之内。因此图 5. 12 的结果仅作有限的参考，其显示的平均值并不能当做确切的结论。

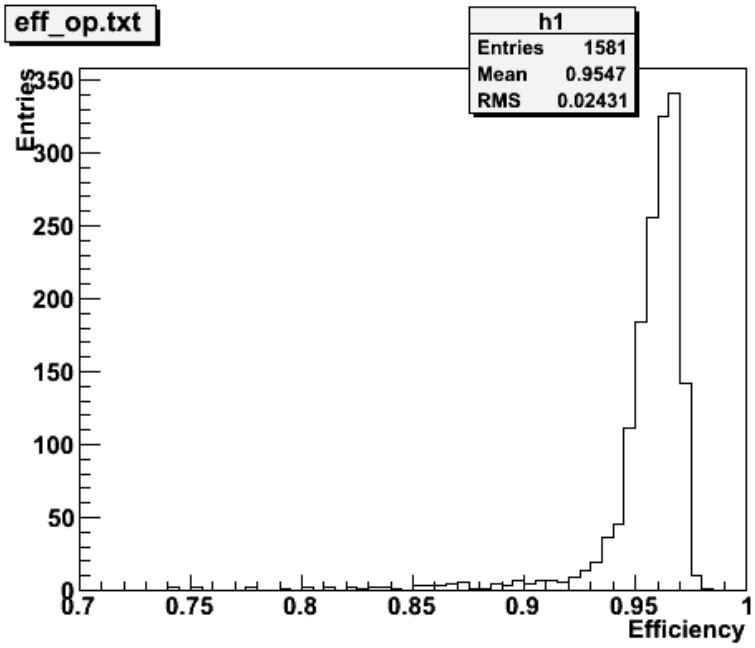

图 5. 10 标准环境下 RPC 在 8000V 高压时的效率统计分布

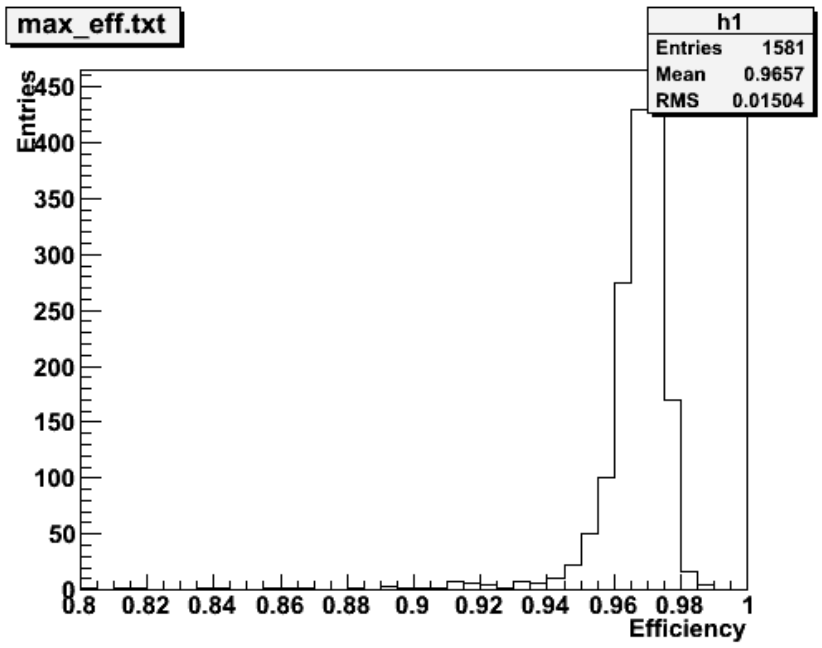

图 5. 11 RPC 最高效率的统计分布

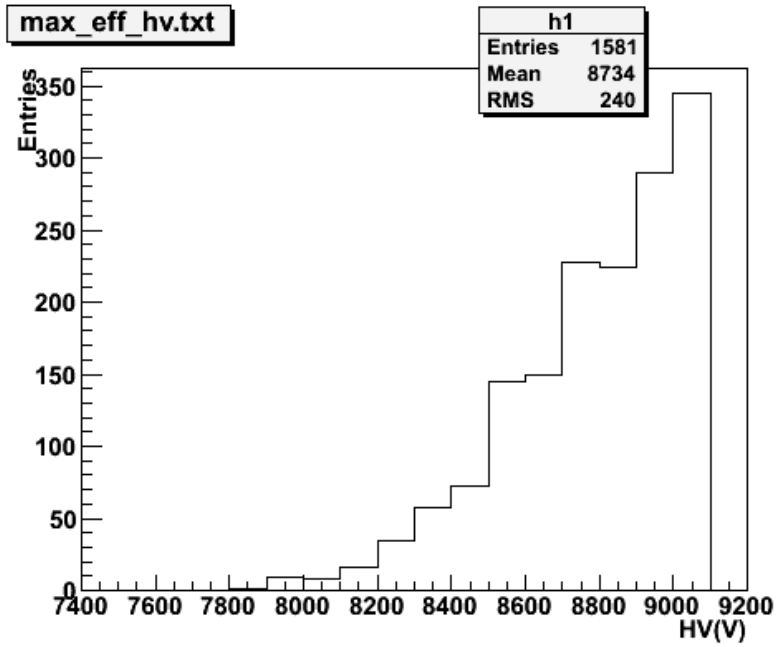

图 5. 12 RPC 效率达到最高时的高压分布

5.3.2.3 几个标志点的高压

针对 RPC 效率曲线的特点，定义几个特殊的标志点，如图 5. 13 所示。第一个是 RPC 效率到达 50%时的高压点，用 V_{50} 表示。第二个是效率到达 95%时的高压点，用 V_{95} 表示。最后一个点是效率曲线的转弯点，用 V_{knee} 表示。RPC 效率在某一段高压范围内近乎直线上升，此时效率对高压的变化最敏感。我们取上升速度最快的三个点，然后做线性拟合，就得到了第一条直线。而到了坪区以后，效率基本不随高压变化，各个高压的效率也呈一条水平的直线。这两条直线的交点在横轴（HV）上的投影就定义为 V_{knee}。这三个点基本上决定了整条 RPC 效率曲线。

图 5. 14 显示的是 V_{50} 的统计分布图。为排除测试环境因素的差异，高压值已刻度到标准环境（其他两个标志点也是如此）。大部分的 RPC 在高压升到 6800 V 到 7100 V 时达到 50%效率。V_{50} 的平均值为 6950 V，RMS 为 135 V，呈高斯分布状。V_{50} 的移动很大程度上代表了整个效率曲线的移动。V_{50}（或者说效率曲线）的摆动暗示的是实际加在 RPC 气隙上的电场强度的波动。由于已经刻度到标准环境，因此可以排除测试环境改变导致的气体密度变化的因素。那么造成这种波动的最大原因应该是 RPC 气隙间距的误差，而且随着高压的升高，这种偏差将被进一步放大。其次是阻性板上压降的不等。

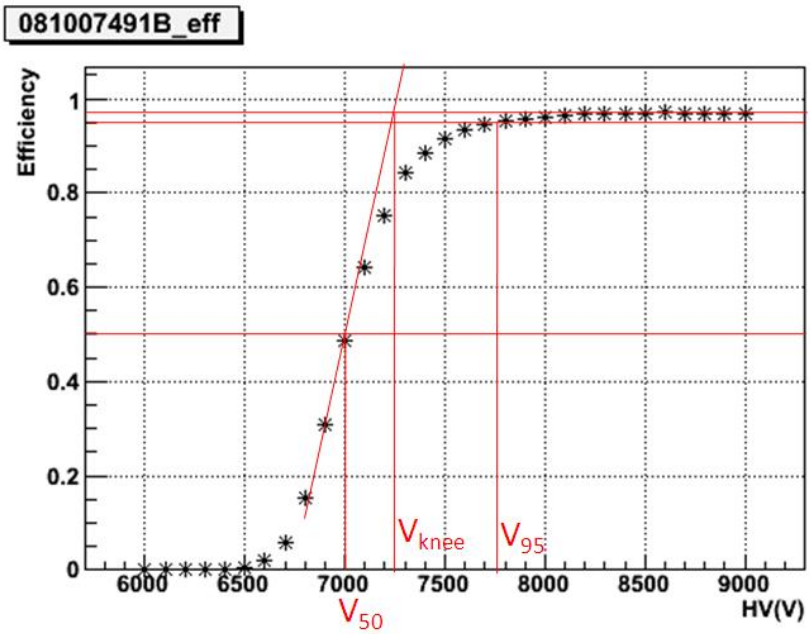

图 5. 13 RPC 效率曲线的几个标志点定义

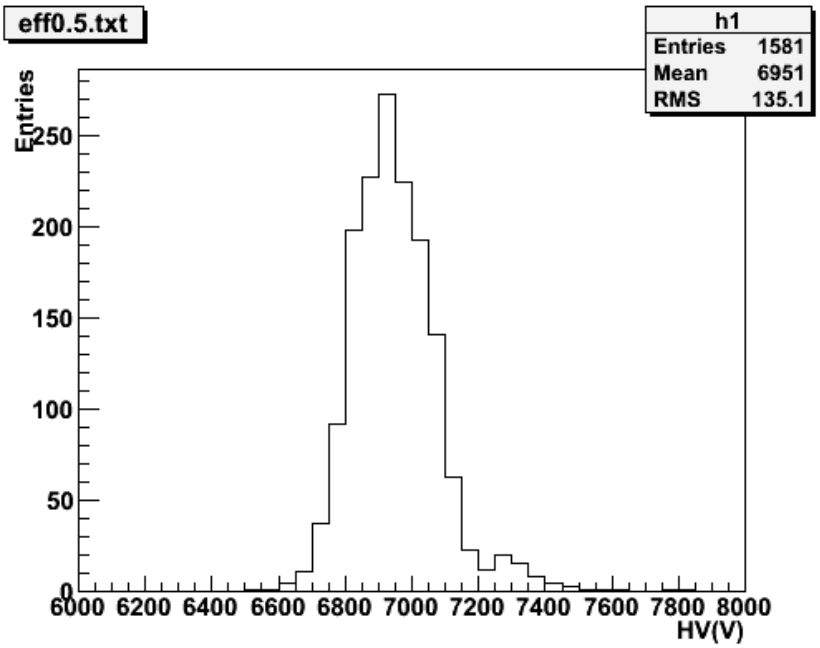

图 5. 14 效率达到 50%的高压值 V_{50} 的分布

图 5. 15 显示的是效率曲线转折点 V_{knee} 的统计分布图。其分布形状与 V_{50} 相似度很高，也呈高斯型。说明两者是对应的。V_{knee} 在 7100 V 与 7500 V 的事例最多，平均值为 7340 V。

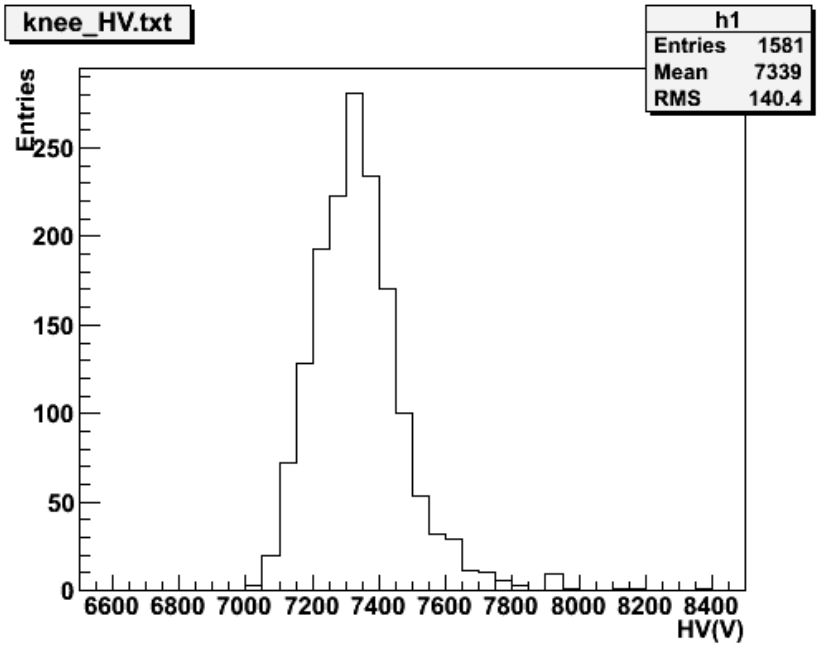

图 5. 15 效率曲线达到转折点的高压值 V_{knee} 的分布

图 5. 16 显示的是效率达到 95%时的高压 V_{95} 的统计分布图。从图中可以看到，V_{95} 在 7500 V 和 7900 V 之间的事例最多，平均值为 7750 V。大约 100 多块 RPC 没有出现在这个统计里，这是因为它们的效率始终没有达到 95%。V_{95} 的分布范围明显比其他两个大，RMS 达到了 240 V。这是因为在更高的高压下，RPC 气隙间距误差导致的电场强度的差别也增加了。

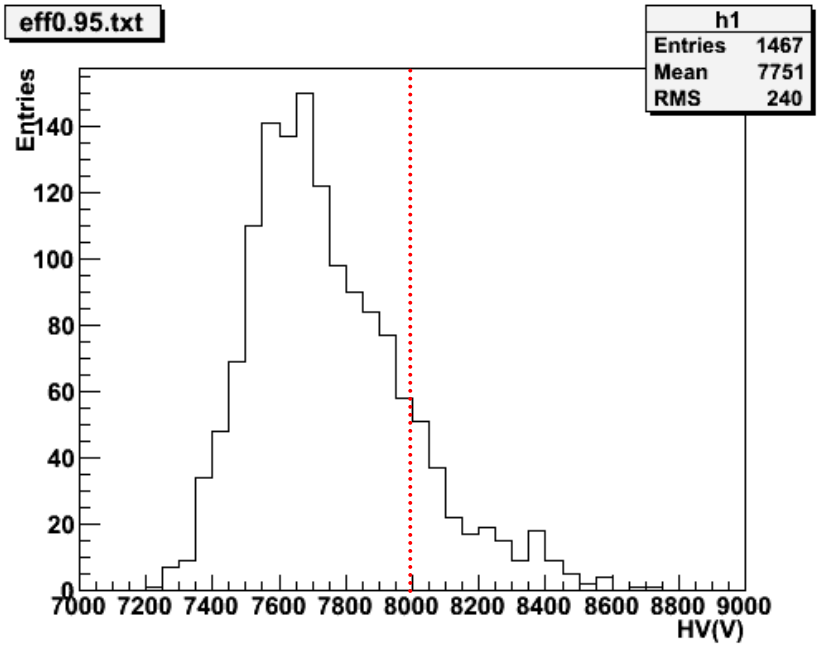

图 5. 16 效率达到 95%的高压值 V_{95} 的分布

RPC 的工作高压取在 8000 V，也就是图中虚线的部位。显然虚线左边部分的

RPC 将全部通过（假定单计数率和暗电流都合格）。虚线右边的 RPC 如果它们在 8000 V 时的效率高于 94%，有一部分也会用于大亚湾实验。

通过对以上几个标志点的分析我们可以发现，大亚湾的各个 RPC，它们效率曲线的分散度是很高的。这也是我们在 5.3.1 小节提出合理工作高压范围以及最佳工作高压概念的原因之一。如果 RPC 的合理工作高压范围比较宽，那就能更好地适应工作环境的变化以及 RPC 个体之间的差异。在第六章 RPC 气体研究部分，将会讲到通过优化 RPC 的工作气体来扩大合理工作高压的范围。

5.3.2.4 效率与体电阻率

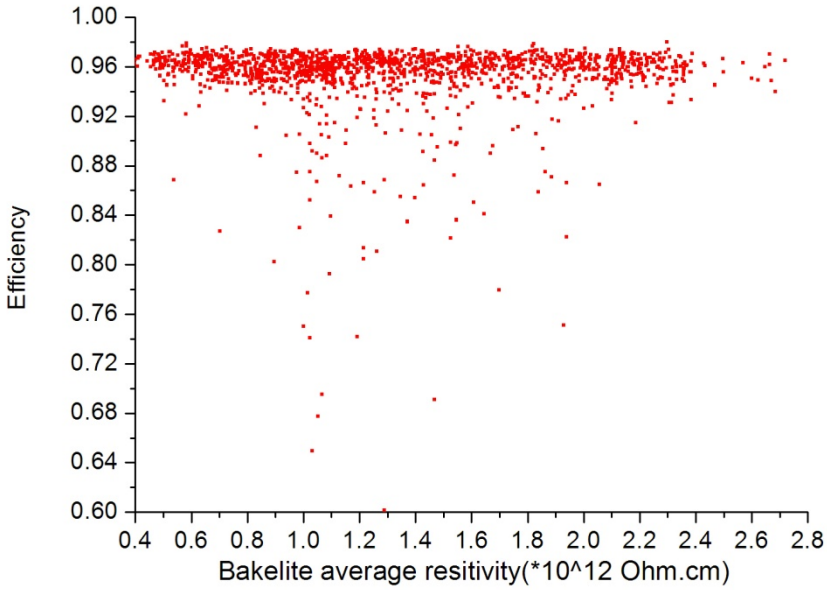

图 5. 17 效率与阻性板平均体电阻率散点图

图 5. 17 显示的是 RPC 的效率与构成 RPC 的两块阻性板的平均体电阻率的关系。图中的每一个点代表一个 RPC，效率是刻度到标准环境的 8000 V 高压下的值，体电阻率是刻度到 20℃的值。从图中基本上看不到明显的规律，说明 RPC 效率在这个体电阻率范围内是比较稳定的。图中大部分低效率的 RPC 其阻性板的平均体电阻率集中在 $0.9 – 1.9 \times 10^{12}\Omega$cm 的范围之内，尤其是当体电阻率上升到 $0.9 \times 10^{12}\Omega$cm 时，低效率 RPC 的比例就突然增多了。这在理论上不太好解释，可能跟 RPC 生产过程中的偶然因素有关。

5.3.3 单计数率

RPC 的单计数率包含了噪声和信号，其中噪声占据了绝大部分，所以单计数率反应了 RPC 的噪声水平。阻性板内侧表面上的毛刺以及坑洼是导致噪声的最大因素。这些可以通过在纯 Ar 下的 training 得到降低。经过 training 后的 RPC，噪声水平基本趋于稳定，但在实际运行的过程中仍然会出现很缓慢的下降。 显然，在保证效率的前提下，单计数率越小越好。我们的质量控制指标是在 8000V 时的单计数率小于 0.8 Hz/cm^2,否则将予以淘汰。

5.3.3.1 统计分布

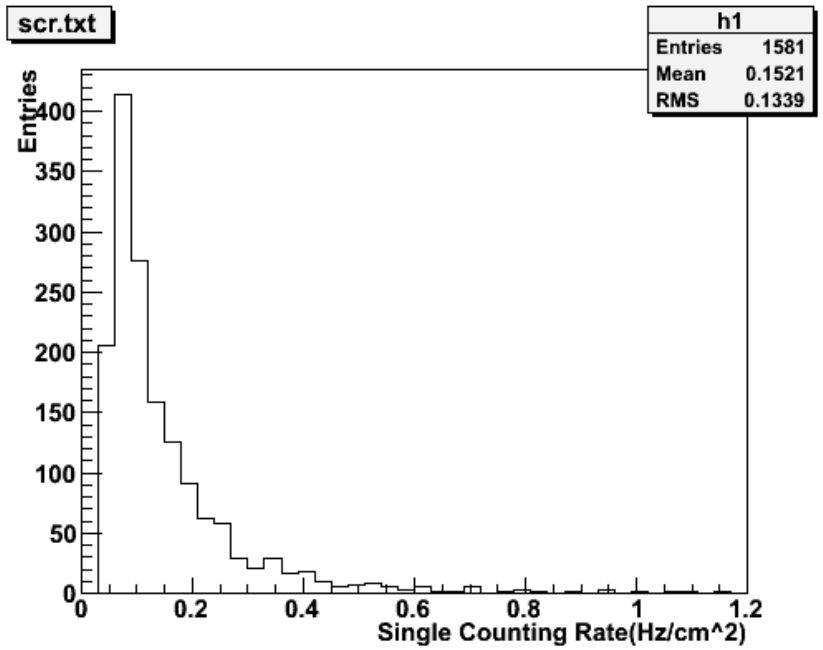

图 5. 18 测试环境下 RPC 8000 V 高压时的单计数率统计分布

图 5. 18 显示的是实测的 8000 V 高压时 RPC 的单计数率统计分布，图 5. 19 是刻度到标准环境下的 8000V 单计数率统计分布。在实测情形下，平均单计数率为 0.15Hz/cm^2，其中有 19 块 RPC 的单计数率超过了 0.8 Hz/cm^2，占总数的 1.2%。在这 19 块 RPC 中，有 8 块的效率也没有达标。所以单计数率的控制淘汰了 11 块 RPC。刻度到标准环境下时，RPC 的单计数率平均值上升了 2%，差别不大。

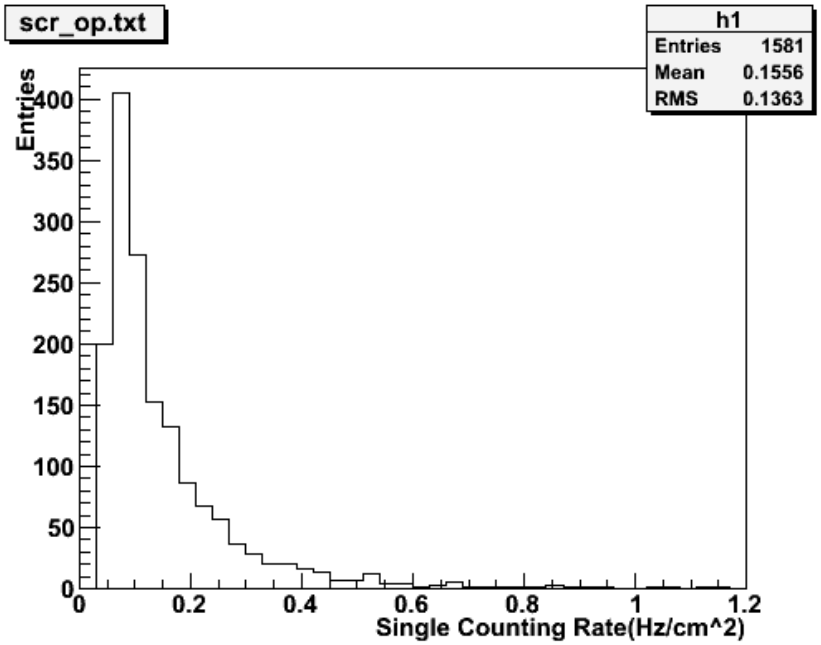

图 5. 19 标准环境下 RPC 在 8000 V 高压时的单计数率统计分布

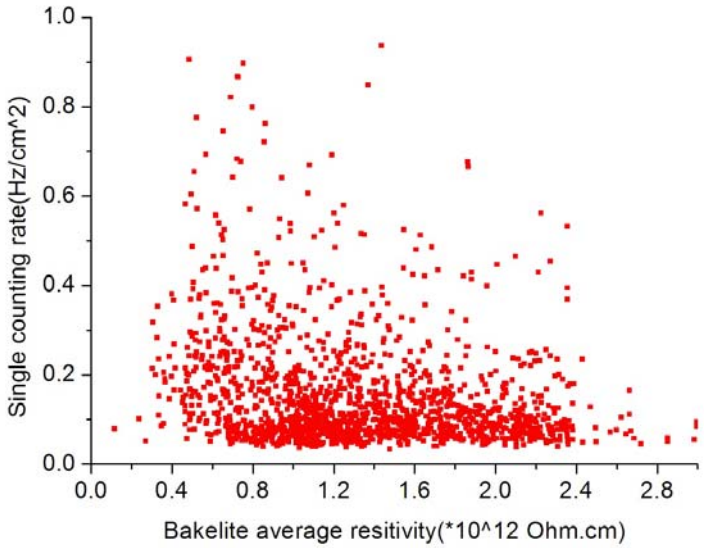

图 5. 20 单计数率和阻性板平均体电阻率的散点图

5.3.3.2 单计数率与体电阻率

单计数率反映了 RPC 的噪声水平，那么肯定与阻性板是有关系的。

图 5. 20 显示的是 RPC 的单计数率与构成 RPC 的两块阻性板的平均体电阻率的关系。图中的每一个点代表一个 RPC，单计数率是刻度到标准环境的 8000 V 高压下的值，体电阻率是刻度到 20 ℃的值。图中点的分布范围呈一个直角三角形，

也就是说，体电阻率越高，单计数率越集中在较低的水平；体电阻率越低，单计数率的分布就比较分散。如果将平均体电阻率每 $0.2 \times 10^{12}\Omega$cm 范围的 RPC 分别统计，计算它们的平均单计数率以及标准差（RMS），结果如图 5. 21 所示。总体来说，阻性板阻值大的 RPC，其单计数率及其 RMS 都较小。体电阻率低于 $0.8 \times 10^{12}\Omega$cm 的阻性板，平均单计数率和 RMS 明显偏大。

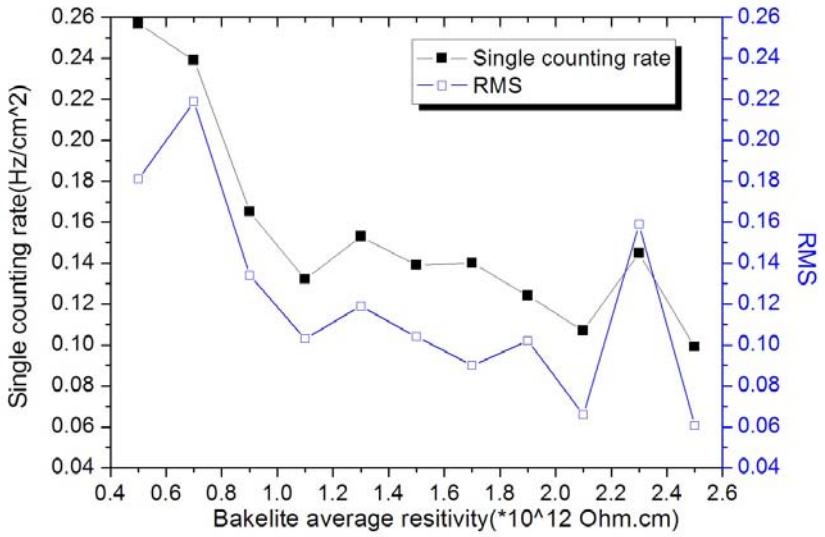

图 5. 21 体电阻率与单计数率及其 RMS 的关系

5.3.4 暗电流

暗电流也是 RPC 重要的性能指标之一。与单计数率一样，暗电流一般也是越小越好，因为大的暗电流将会影响 RPC 的使用寿命。所以大亚湾 RPC 对暗电流的质量控制要求每个 RPC 都小于 10 $\mu A/m^2$，否则将予以舍弃。

5.3.4.1 统计分布

图 5. 22 显示了实测的 8000 V 高压时 RPC 的暗电流统计分布，图 5. 23 是刻度到标准环境下的 8000V 暗电流统计分布。在实测情形下，暗电流的平均值为 2.55 $\mu A/m^2$，远小于质量控制的最大值。刻度到标准环境情形下，平均暗电流高了 3.5%，幅度很小。在实测情况下，暗电流高于 10 $\mu A/m^2$ 的 RPC 一共有 13 块，其中的 12 块其效率或者单计数率也不合格。所以在暗电流控制环节，淘汰的 RPC 只有一个。

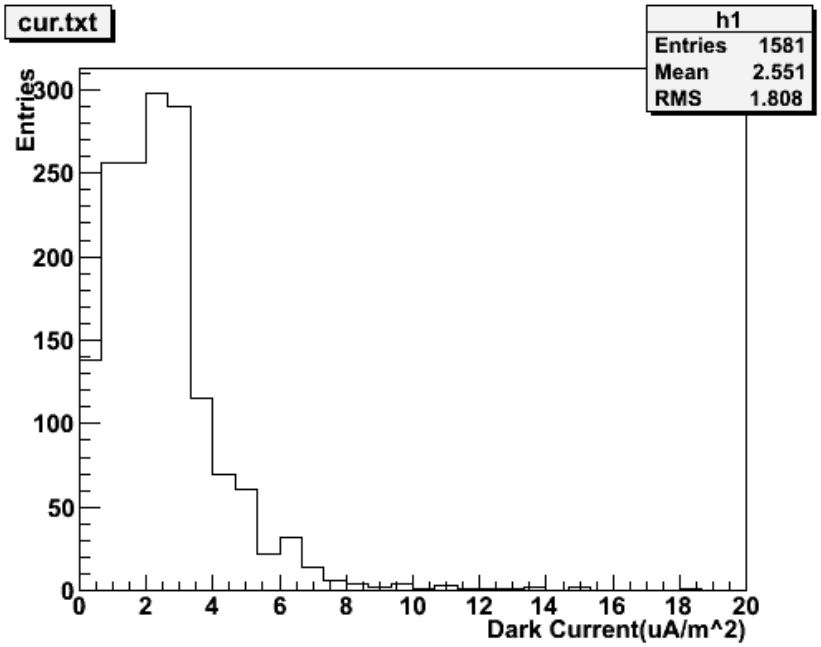

图 5. 22 测试环境下 RPC 8000 V 高压时的暗电流统计分布

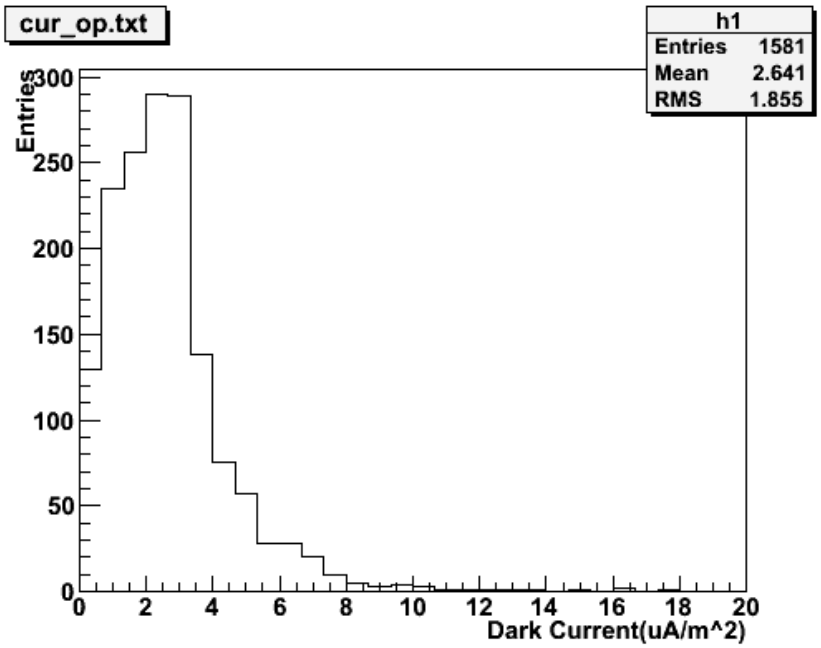

图 5. 23 标准环境下 RPC 在 8000 V 高压时的暗电流统计分布

5.3.4.2 暗电流与体电阻率

图 5. 24 显示的是暗电流与阻性板平均体电阻率关系的散点图。同样这里的值都已经经过刻度。与图 5. 20 中单计数率散点图相比较，可以发现两者之间的某种相似之处。使用体电阻率较小的阻性板，暗电流的分布范围比较广，出现大暗电

流的情况比较多。使用体电阻率较高的阻性板，暗电流比较小，而且更加集中。

图 5. 25 表示的是每个体电阻率 $0.2 \times 10^{12}\Omega$cm 范围内的 RPC 暗电流的平均值以及 RMS。从图中可以看到，随着体电阻率的上升，平均暗电流和 RMS 大致都是减小的趋势。阻性板体电阻率小于 $1 \times 10^{12}\Omega$cm 时，暗电流和 RMS 上升非常快。

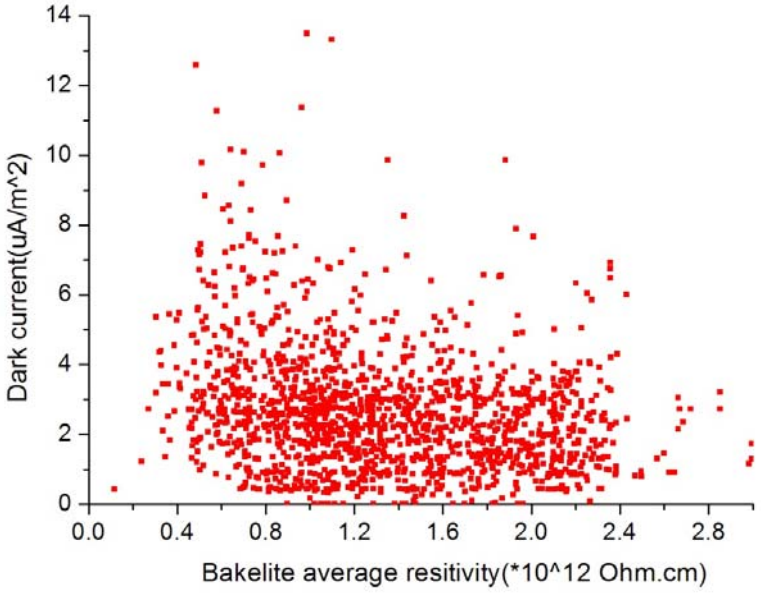

图 5. 24 暗电流和阻性板平均体电阻率的散点图

5.3.4.3 暗电流与单计数率的关系

比较图 5. 25 和图 5. 21，可以发现单计数率和暗电流的变化规律相似度很高。这是意料之中的，因为 RPC 的暗电流可以理解成为单位时间内 RPC 内部放电的电荷量，也就是说 RPC 内部的每一次放电既贡献了暗电流也贡献了单计数（如果过甄别阈的话）。图 5. 26 更加直观地表示来了单计数率和暗电流的关系。从图中可以看到，RPC 的分布基本呈一个带状，单计数率高的暗电流也普遍较大，反之亦然。图 5. 27 将所有 RPC 的暗电流比单计数率的值作了统计（8000 V）。这个比值的平均值为 20 左右，分布比较集中。这个值一定程度上可以理解为此时 RPC 信号电荷量或者说幅度的分布情况。

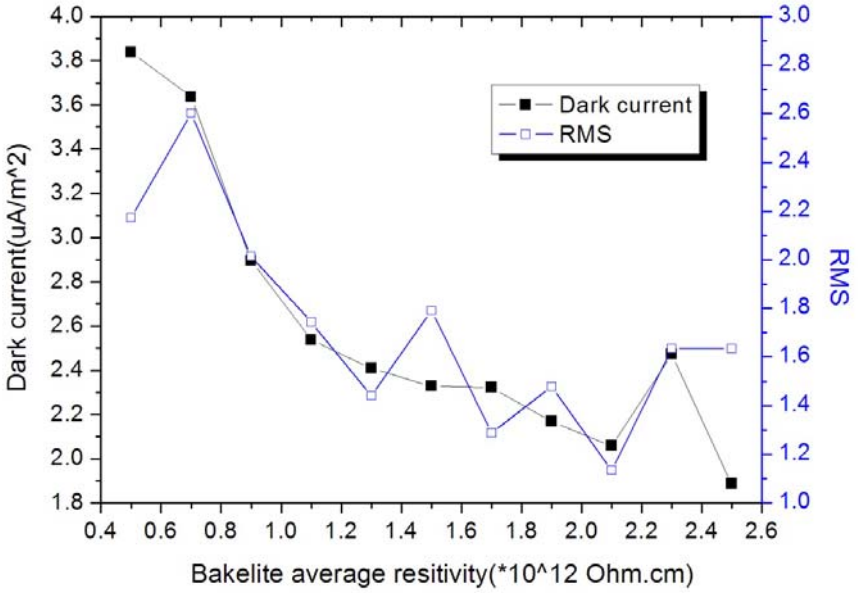

图 5. 25 体电阻率与单计数率及其 RMS 的关系

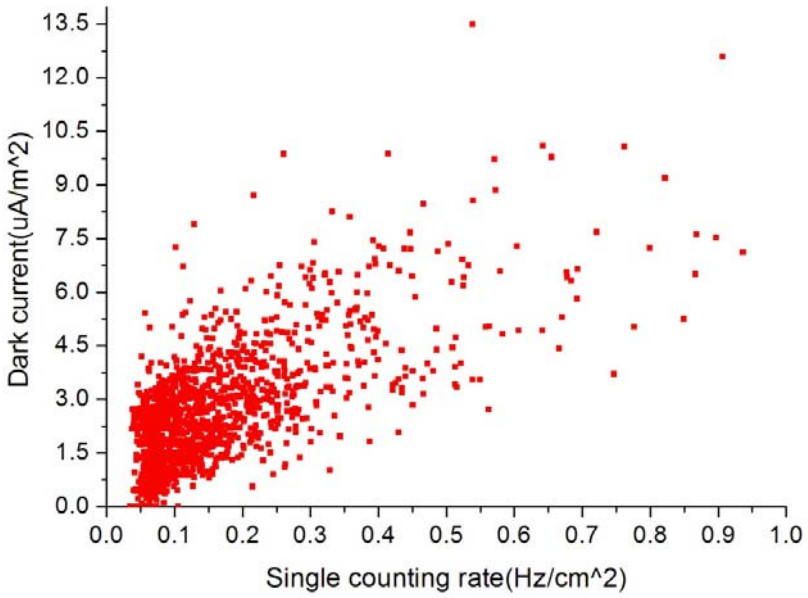

图 5. 26 RPC 的暗电流与单计数率

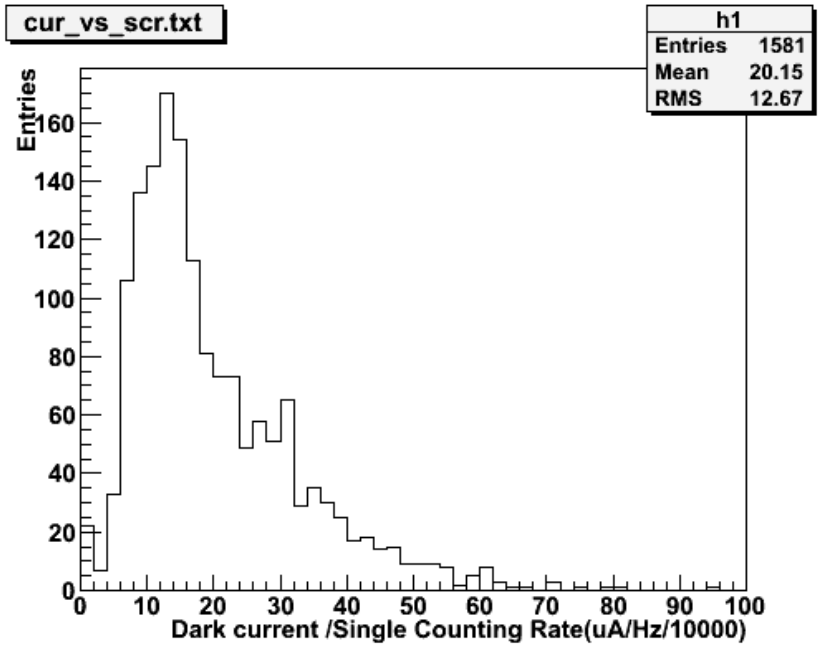

图 5. 27 RPC 暗电流除以单计数率的值的分布（8000 V）

5.3.5 生产日期与性能

大亚湾应用的 RPC 数量较大，RPC 的批量生产也经历了一个较为漫长的时期。第一批的约 1600 个 RPC 是从 2008 年 1 月开始生产，到 2009 年 5 月结束的。图 5. 28 显示了各个生产月份的 RPC 的平均效率。横轴中的 1 代表第一个生产月份（2008 年 1 月），2 代表第二个生产月份，依次类推（下同）。一共 17 个生产月，其中有 13 个月的月平均效率达到了 95%以上。平均效率最高的月份是 2008 年 4 月，达到了 96.4%；最低的月份是第 14 月即 2009 年 2 月，只有 90.4%。总体来说，初期的 RPC 效率比较高；后期的 RPC 效率相对较低。特别是 2009 年 1 月和 2 月，平均效率下降幅度非常大，这可能是当时气温太低，而制作工艺控制的不好造成的。

图 5. 29 显示的是各个生产月份的 RPC 平均单计数率和暗电流。将它们放在一块可以更明显地看到，单计数率和暗电流的变化趋势是非常一致的。单计数率和暗电流的最高点出现在生产初期 2008 年 3 月。到了后期，两者都下降到一个比较低的水平，分别只有最高点时的四分之一和三分之一左右。结合前面关于单计数率、暗电流与阻性板体电阻率关系的分析可以推测，在生产后期的阻性板体电阻率比前期明显要大。图 5. 30 对各个生产月份的 RPC 所使用的阻性板的体电阻率进行了统计。从图中可以发现，前十四个生产月份，体电阻率的变化与图 5. 29 中单计数率暗电流的变化基本可以对上，即体电阻率越大，单计数率暗电流越小。后

三个月的数值就对不上了，测得的单计数率和暗电流都很小，但是体电阻率显示的值也很小。这里的原因可能是：一，阻性板在长期的放置过程中风干导致实际体电阻率比测量的时候大。二、最后 3 个月生产 RPC 所用的阻性板有很大部分是先前体电阻率测试不合格而淘汰的。而这些不合格的阻性板大多是因为体电阻率过大。高能科迪公司对这些阻性板体电阻率的重新测试后大部分又合格了，并用于了 RPC 的制作。可以推测，重测的结果有很大的概率是不可靠的，存在人为因素的干扰。

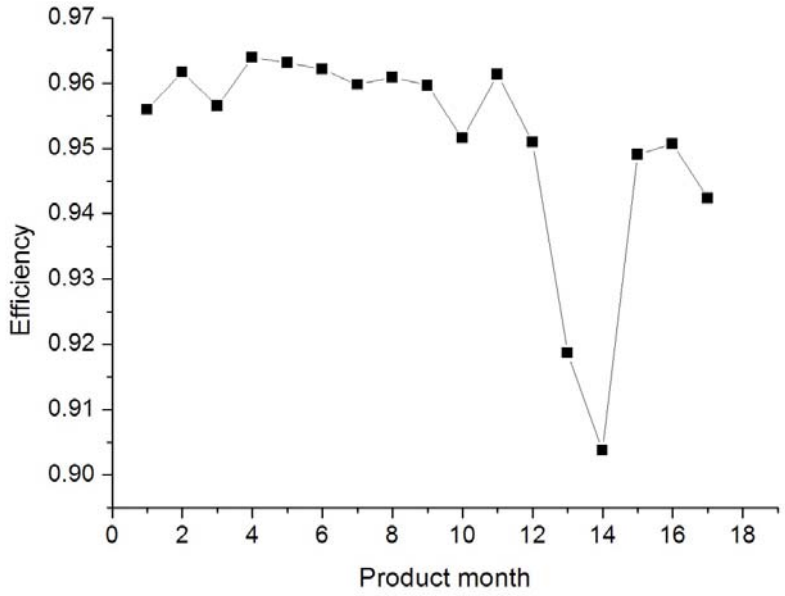

图 5. 28 各个生产月份的 RPC 平均效率

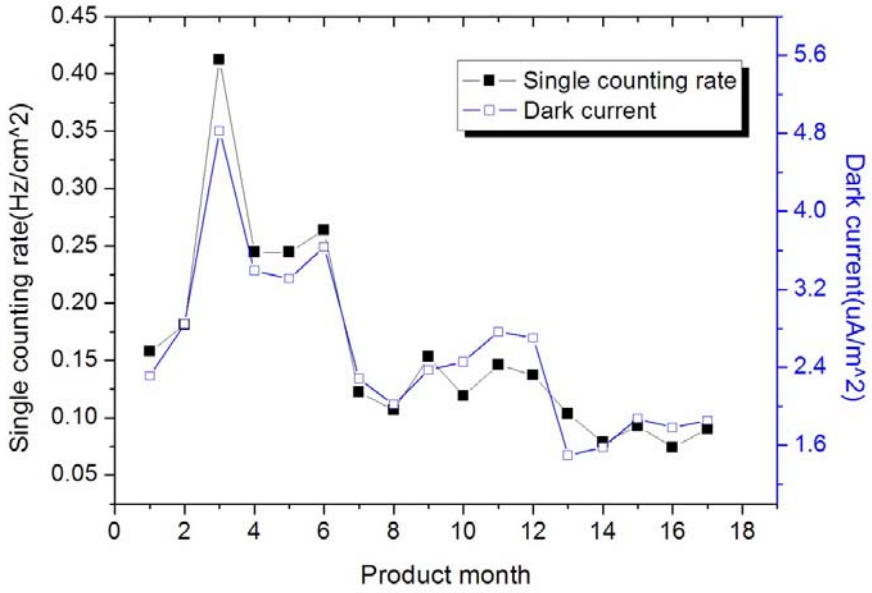

图 5. 29 各个生产月份的 RPC 平均单计数率和暗电流

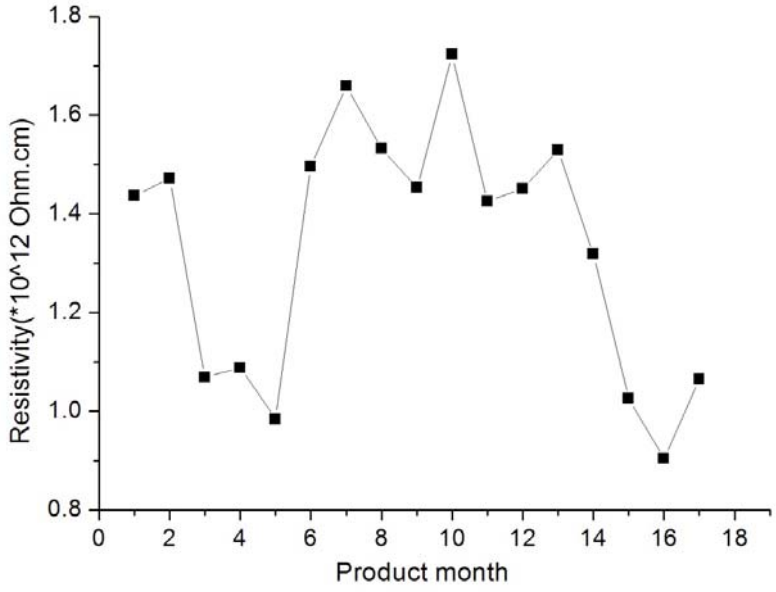

图 5. 30 各个生产月份使用的阻性板平均体电阻率

5.4 RPC 模块测试*

通过宇宙线测试的 RPC 被组装成模块后，还要进行第二次宇宙线测试。这次测试的目的是对整个模块的状态和性能的检验。

* 此部分工作主要由关梦云、徐吉磊完成

5.4.1 测试系统

图 5. 31 展示了整个 RPC 模块测试系统。图片左边架子上摆放的就是组装完毕的 RPC 模块。每个模块配备一个 FEC 板作为电子学读出。位于最上面的一个和最底下的两个模块作为 trigger 模块，一般是不动的。触发的条件是 4 选 2 模式，也就是说只要有两个探测层有信号，就认为是宇宙线事例而产生触发。中间摆放的是正在测试的模块，最多可以放置 6 个。为了获得更多的触发事例，在处理数据的时候选择 trigger 模块的方式是灵活的，位于中间的待测试模块可以选取与其相邻的上一层和下两层共三个模块作为 trigger 模块。图片右边是气体系统。模块测试所用的气体与将来在大亚湾正式运行的气体基本一致，各种气体的比例依次为 Ar/R134a/Isobutane/SF_6 = 65.5/30/4/0.5。每次测试之前换气 5 个体积左右。在此气体比份下，选取 7600 V 作为测试高压。模块中 RPC 信号的甄别阈设置为 30 mV。

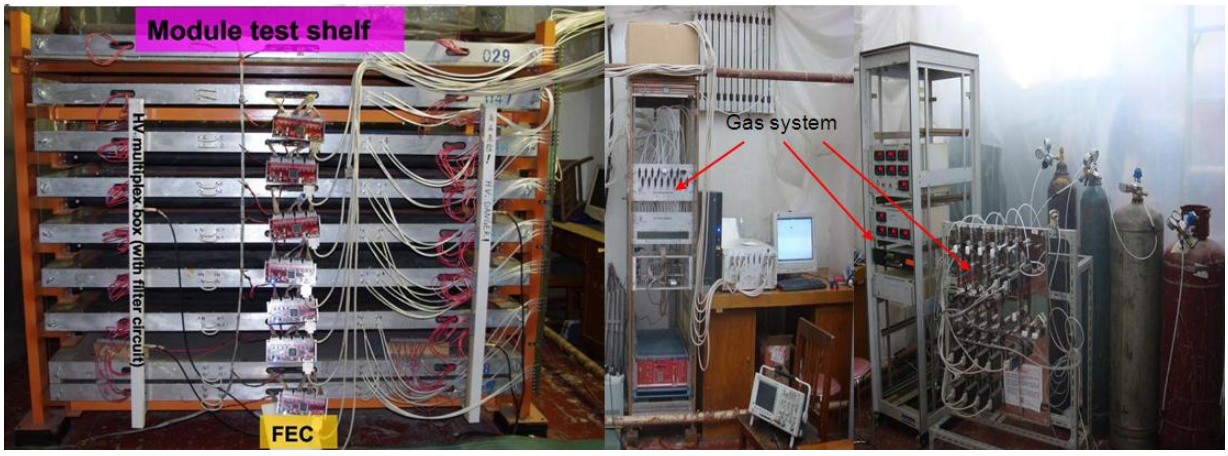

图 5. 31 RPC 模块测试系统

5.4.2 初步测试结果[40]

由于模块内部的读出条呈 X、Y 方向分布，条宽约为 26 cm，所以模块的宇宙线测试可以测得每个 26 × 26 cm^2 区域的效率。一个模块一共分为 8 × 8 个这样的小块。每次测试的事例数约为每个小块 10 万左右。 图 5. 32 显示了某个模块的 64 个小块的 4 选 2、4 选 3 效率。图中可以看到这个模块中，大部分小块的效率都在 99%以上。中间 16 个小块的 4 选 3 效率比其他小块低了大约 5%左右，这是由 RPC 裸室边缘的死区造成的。

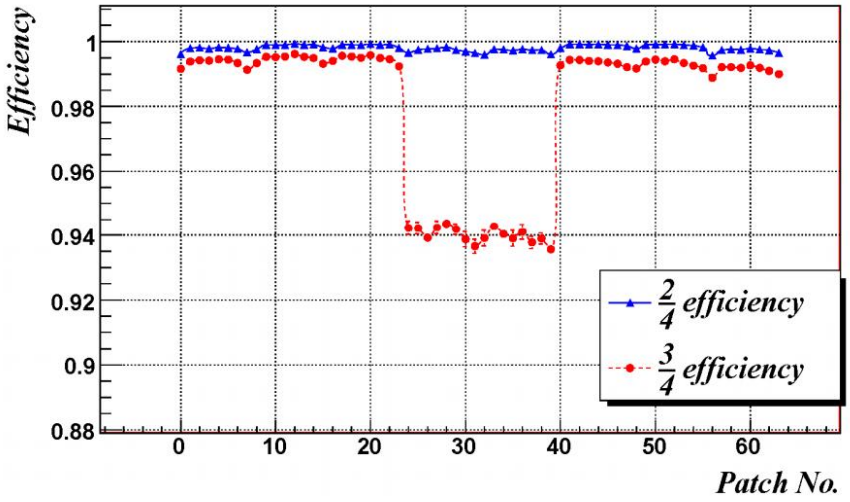

图 5. 32 某个模块的 64 个小块效率

截止 2010 年 4 月，已经完成了 108 个模块的宇宙线测试。图 8. 9 是模块整体效率的统计分布图。4 选 2 和 4 选 3 的平均效率分别达到了 99.8%和 97.9%。4 选 3 效率的分布相对较宽，这是由于其更容易受死区以及 RPC 裸室效率高低的影响。

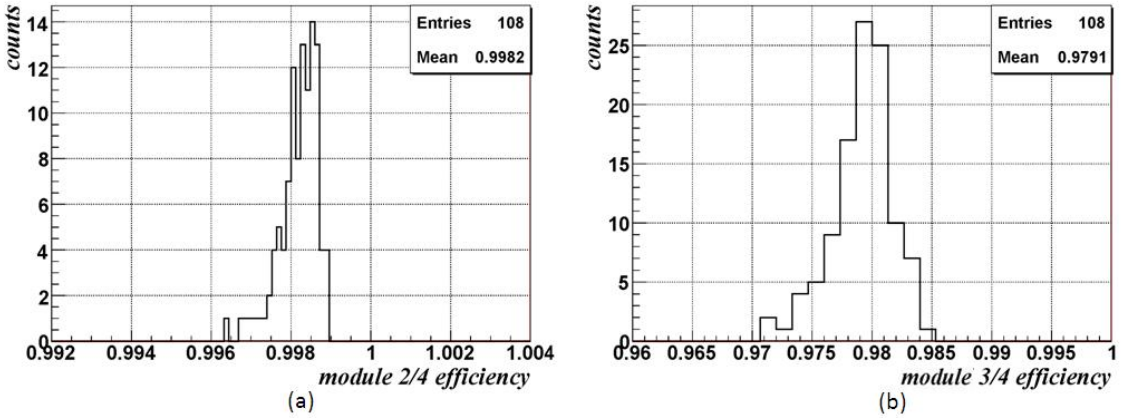

图 5. 33 RPC 模块效率统计。（a）4 选 2 效率（b）4 选 3 效率

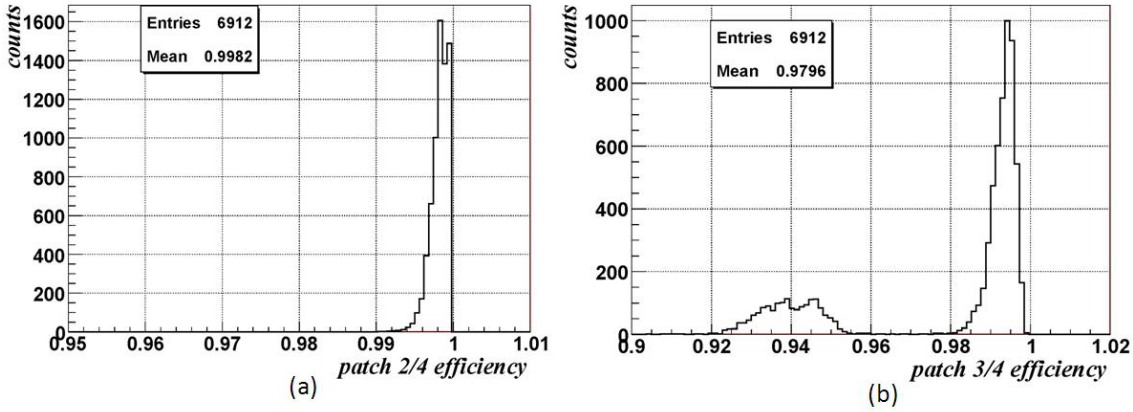

图 5. 34 RPC 模块小块区域统计。（a）4 选 2 效率（b）4 选 3 效率

图 5. 34 是模块小块区域的效率统计。其 4 选 2 和 4 选 3 的平均效率与模块整体都各自符合。4 选 3 效率的统计图在 94%附近有一个鼓包，这些都是包含死区的小块。

5.5 本章小结

本章介绍了大亚湾 RPC 的宇宙线测试。首先对宇宙线测试系统以及测试流程作了一些基本的介绍。接着重点介绍宇宙线测试的数据结果。所有生产的 RPC 平均效率达到了 95%以上，平均单计数率和暗电流分别在 0.15Hz/cm^2 和 2.6 μA/m^2 左右。通过定义标志点，分析了效率曲线的分布情况。另外还分析了 RPC 效率、单计数率、暗电流与阻性板的关系以及单计数率和暗电流之间的相互关系。最后简单介绍了一下 RPC 模块的测试结果。

第六章 RPC 工作气体的研究

RPC 探测器可以工作在两种模式下：雪崩模式和流光模式。两者的信号特点不同，所使用的工作气体也有着较大的不同。大亚湾 RPC 工作在流光模式下，主要是利用其信号大的特点。为了优化 RPC 探测器的性能，本章对流光模式下 RPC 的工作气体进行了研究。期望能对将来大亚湾上的正式运行提供有用的参考。

6.1 简介

流光模式下，RPC 的工作气体通常是三种气体混合而成的，分别是氩气(Ar)、氟利昂($C_2H_2F_4$)、和异丁烷(i-C_4H_8)。Ar 是电离气体，主要作用是在探测器内部产生雪崩和流光信号。氟利昂是淬灭性气体，通过吸收电子达到抑制流光信号进一步发展的作用。氟利昂在工业中被当做制冷剂而得到广泛引用，也因其“臭氧层杀手”的身份而被广为人知。原因是其在强烈紫外线的作用下分解出的氯原子，能与臭氧发生连锁反应，不断破坏臭氧。我们使用的环保型氟利昂 R134a 由于其不含氯离子，因而不会破坏空气中的臭氧层。但它仍然属于温室气体，一个 R134a 分子产生的温室效应是一个 CO_2 分子的 1300 倍[41]。另外，国外的实验中已经发现，氟利昂在 RPC 内部高压作用下与水蒸汽分子发生反应会形成少量氢氟酸(HF)[42]，一定程度上可能会腐蚀 RPC 的内表面。因此降低氟利昂在混合气体中的使用比例，无论从环保还是保护探测器的角度来说，都是有益的。流光模式下工作的 RPC，一般加 10%左右的 Isobutane，用来淬灭紫外光子。需要注意的是，Isobutane 是一种易燃气体，与空气混合能形成爆炸性混合物，因此是一种相当危险的气体。大亚湾实验对气体安全性的要求非常严格，因此在保证探测器的性能的前提下降低 Isobutane 的含量也是我们的一个研究方向。近年来，国外的 RPC 研究小组已经开始尝试在传统的 RPC 工作气体中添加少量的六氟化硫(SF_6) [43][44]。六氟化硫是一种强淬灭性气体，对电子有很强的吸附能力，可以起到比氟利昂更强的作用。另外它的温室效应也是惊人的，为 CO_2 的 22800 倍[45]，因此从环保的角度讲，不能用得太多。

实验所采用的测试系统与 RPC 批量测试用的宇宙线测试系统完全一致，具体内容见 5.1 节所述。用于实验的 RPC 为大亚湾的正式 RPC，实验的结果具有代表性。RPC 的工作性能跟环境温湿度以及大气压有关。湿度主要影响 RPC 阻性板的

阻值，由于 RPC 表面覆了 PET 膜，因此环境湿度的变化对 RPC 的影响非常小，可以忽略不计。环境温度和气压主要通过影响 RPC 内部工作气体的密度来影响 RPC 的性能。当气体密度变小时，气体分子的间距变大，这样在电子雪崩的过程中如果要保持电子碰撞的频率就需要更高的电场强度，也就是要求更高的高压。温度和气压的改变导致的结果是使 RPC 性能随高压变化的曲线发生偏移，关系如下[47]：

$$V = V_a \times (P_0 / P) \times (T / T_0) \tag{7.1}$$

在整个实验的过程中，我们十分小心地控制了实验室的温度，使之始终保持在 20°C 左右，绝对温度 T 的偏差<0.1%。大气压的变化也在 5 mb(0.5%)以内。因此可以说由环境因素带来的高压的偏差非常小，为方便起见下面的实验结果中都没有引入环境因素的修正。

6.2 Isobutane

降低可燃的 Isobutane 在大亚湾 RPC 工作气体中的比例是我们的研究方向之一。在 BESIII 实验中，RPC 的工作气体为 Ar/R134a/Isobutane = 50/42/8, 即含有 8%的 Isobutane。根据普林斯顿大学陆昌国教授的计算分析，Isobutane 在混合气体中的比份小于 4%时，才可以认为此混合气体是安全不可燃的[46]。所以我们首先要回答的问题是把 Isobutane 的比份降低后，RPC 还能不能正常工作？

在流光模式下，Ar 在 RPC 工作气体中的比份一般在 50%到 75%之间。我们把 Ar 固定为 65%这一比较适中的值，把 Isobutane 的比份调整为 6%，4%，3%，2%，1%，R134a 的比份也作相应的改变，然后分别测试 RPC 的效率、单计数率、暗电流曲线，并互相比较。图 6. 1，图 6. 2 和图 6. 3 分别为效率、单计数率、暗电流的对比图。

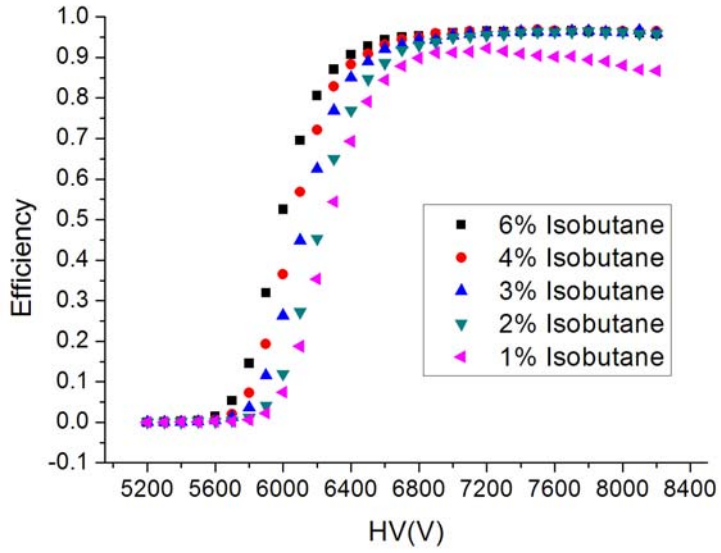

图 6. 1 Ar 固定为 65%，Isobutane 从 1%改变到 6%时的效率曲线

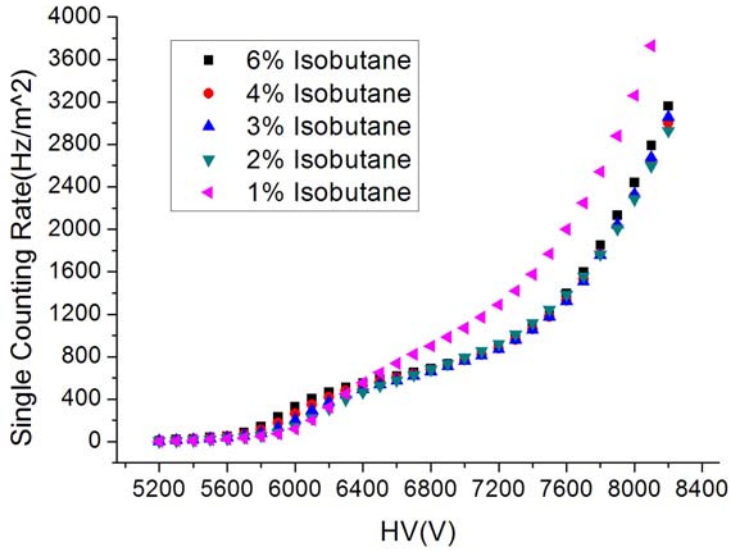

图 6. 2Ar 固定为 65%，Isobutane 从 1%改变到 6%时的单计数率曲线。

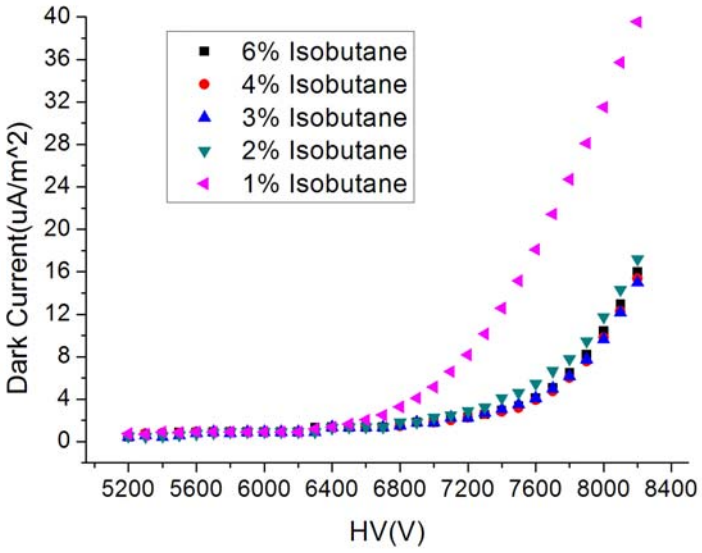

图 6. 3Ar 固定为 65%，Isobutane 从 1%改变到 6%时的暗电流曲线

从图 6. 1 中可以看到，当 Isobutane 的比份不低于 2%时，RPC 的效率曲线基本正常，有着较长的坪区，坪区效率也几乎一致地高，约 96%。当 Isobutane 降到 2%以下时，RPC 的效率随着高压逐步上升到约 92%时开始下降。效率坪区非常短而且达不到正常的水平。从图 6. 2 和图 6. 3 中可以看到，Isobutane2%到 6%时的单计数率和暗电流曲线差别不大。当 Isobutane 比份小于 2%时，单计数率和暗电流都明显增加。此时 Isobutane 不能吸收足够的紫外光子，淬灭效果大大降低。

上面的实验结果表明，Isobutane 在混合气体中的比份存在着一个下限，要使得 RPC 能正常工作，Isobutane 的比份必须高于这个下限。在 65%Ar 的情况下，Isobutane 的含量只要达到 2%或以上，就可以起到良好的淬灭效果，能保证 RPC 正常工作。所以大亚湾实验所要求的 Isobutane 降到 4%是完全可行的。

6.3 Ar 与工作高压

Ar 在 RPC 工作气体中扮演电离气体的作用。一般来说，Ar 分子的浓度越大，就越容易发生雪崩，RPC 达到相同效率所需要的高压就越小。根据上一节的实验结果，我们可以把 Isobutane 固定为 4%，通过改变 Ar 的比份，来测试 RPC 的性能随着 Ar 比份的改变所产生的变化。

把 Ar 比份分别设定为 55%、60%、65%、70%、75%，R134a 的比份也作相应

的调整，对效率、单计数率和暗电流进行高压扫描。需要说明的是，对不同气体扫描高压的范围不尽相同。原因是 Ar 比份相差较大的气体，其效率坪出现的区域也相差较大。对于高 Ar 含量的气体，扫描的高压比较低，因为高压太高时 RPC 内部放电剧烈，产生的大信号有可能损坏电子学。

图 6. 4 是各种气体下的效率曲线。当 Ar 比份增加时，效率曲线左移，即达到相同效率所需要的高压降低。这与上面我们的预期相一致。从图中看，偏移量也大致均匀，约为 70V/1%。各种气体下 RPC 所能达到的最高效率基本相同，约为 96%左右。

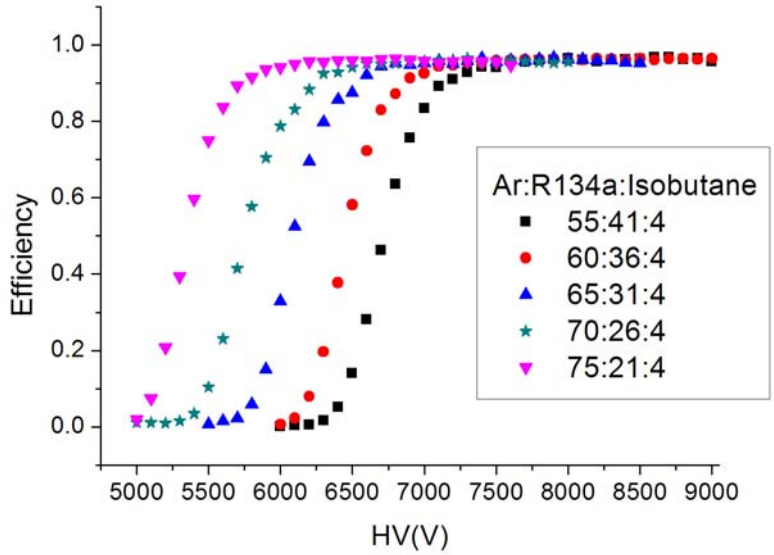

图 6. 4 Isobutane 固定为 4%，不同 Ar 比份下的效率曲线

图 6. 5 和图 6. 6 表示，当 Ar 含量增加时，单计数率和暗电流均明显上升。在图 6. 5 中可以发现，随着高压的升高，单计数率会到达一个坪区，在此区域内单计数率上升较缓。坪区结束后，单计数率则急剧上升，此时暗电流也急剧上升（图 6. 6），两者出现“转折点”的高压几乎一致，这意味着 RPC 已经由流光模式转换到放电模式。如果我们把这个转折点高压定义为 V_2，把效率达到 95%时的高压定义为 V_1，那么基于既要保证 RPC 效率，又不能让单计数率和暗电流过大的要求，RPC 的工作高压的合理选择范围就在 V_1 和 V_2 之间。显然范围 $R = V_2 – V_1$ 这个值越大越好，而最佳工作高压 V_O 应该是 V_2 与 V1 的中点。表 6. 1 列出了各种气体下工作高压的选择范围、最佳工作高压以及在最佳工作高压下 RPC 的效率、单计数

率和暗电流。Ar 比份 75%情况下，工作高压的选择范围 R 明显较小，只有 200V。对于其他气体，R 都在 500V 左右。V_O 随着 Ar 比份的增加而降低，而在 V_O 下的效率在误差范围内基本相同。V_O 下的单计数率也基本不变。暗电流随着 Ar 增加而逐步升高，本实验所用的 RPC 幅度约为 0.55 μA/m^2 每 10% Ar。

根据上面的实验结果，RPC 如果工作在 75% Ar 情况下，工作高压的选择范围比较小，只有 200V，难以应付在实际运行中出现的诸如气压、温度浮动、气体比分偏移以及 RPC 个体差异等情况带来的最佳工作高压的偏移。R 太小是由于放电太大，RPC 内部淬灭不充分引起的（虽然还没有导致效率的下降），如果加入强淬灭性气体 SF_6 可以期望得到一定的改善。

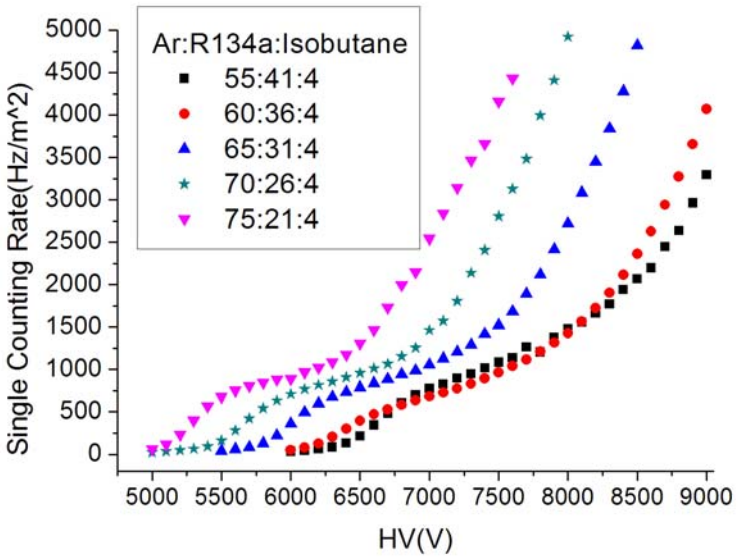

图 6. 5Isobutane 固定为 4%，不同 Ar 比份下的单计数率曲线

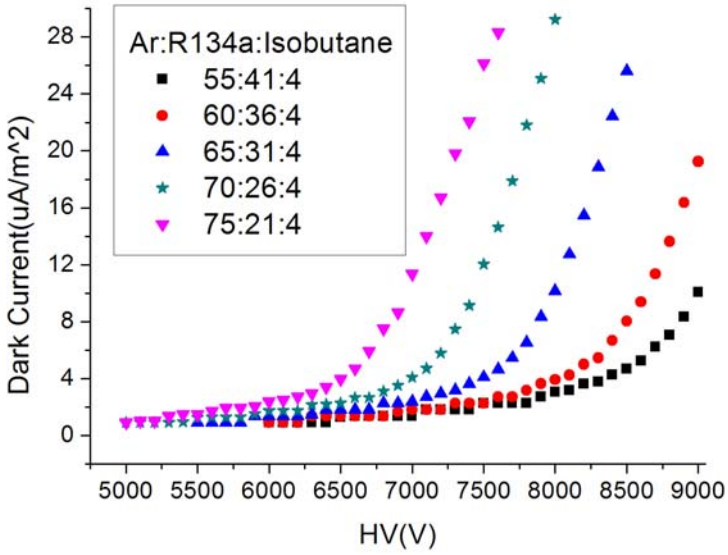

图 6. 6 Isobutane 固定为 4%，不同 Ar 比份下的暗电流曲线

表 6. 1 Isobutane 4%时，不同 Ar 下工作高压的选择

Gas mixture (Ar:R134a:Iso-butane)	V_1(kV)	V_2(kV)	R=V_2-V_1 (kV)	V_O(kV)	Efficiency (%)	SCR (kHz/m^2)	Dark current (μA/m^2)
55:41:4	7.6	8.0	0.4	7.8	95.8±0.20	1.21	2.3
60:36:4	7.3	7.8	0.5	7.6	96.0±0.28	1.04	2.7
65:31:4	6.9	7.5	0.6	7.2	95.8±0.24	1.21	2.9
70:26:4	6.6	7.0	0.4	6.8	96.0±0.18	1.18	3.2
75:21:4	6.3	6.5	0.2	6.4	95.9±0.23	1.18	3.4

6.4 六氟化硫（SF_6）

6.4.1 不同 SF_6 比份的气体

选取 Ar/R134a/Isobutane = 75/21/4 的气体作为 baseline，向里面加入 0.25%，0.5%，0.75%，1%的 SF_6，选取合适的高压范围进行扫描，记录效率、单计数率和暗电流曲线并与无 SF_6 的情况作比较，如图 6. 7，图 6. 8，图 6. 9 所示。

在图 6. 7 中，效率曲线随着 SF_6 的增加而逐渐右移，即达到同样的效率所需要的高压增加了。右移的速度大致均匀，约为 50V/0.1%。而 RPC 的坪区效率基本上不受影响。SF_6 还可以对 RPC 的单计数率和暗电流起到很大的压制作用。而且 SF_6 有一个特性是，只要在气体中加入一点，即可发挥明显的作用；如果继续增加它

的含量，作用的提升就很小了。如图 6. 8 和图 6. 9 所示，加了 SF_6 的混合气体，单计数率和暗电流均明显低于没有 SF_6 的气体，而且这几种加了 SF_6 的气体，两种曲线都靠得很近，没有很大的区别。

SF_6 不仅对单计数率和暗电流有明显的压制作用，还能降低 RPC 信号的幅度。让 RPC 在各种气体比分下均运行在最佳工作高压，改变电子学的信号幅度阈值，RPC 的效率将发生变化，而变化的曲线是不一致的，如图 6. 10 所示。使用没有加 SF_6 的气体，RPC 效率大概在阈值升到 150 mV 到 200 mV 之间时才开始下降，说明 RPC 的信号幅度大部分都在 150 mV 到 200 mV 以上。 加入 SF_6 的气体，随着阈值的升高，效率马上就降下来了。加入 SF_6 越多，效率开始出现下降所需的阈值越小。说明 SF_6 确实降低了 RPC 信号的幅度。

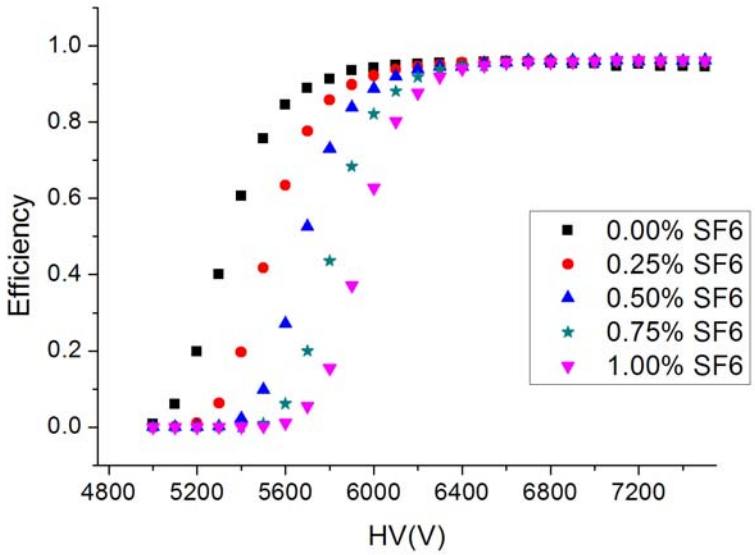

图 6. 7 在 Ar/R134a/Isobutane = 75/21/4 的基本气体中加入不同量 SF_6 的效率曲线

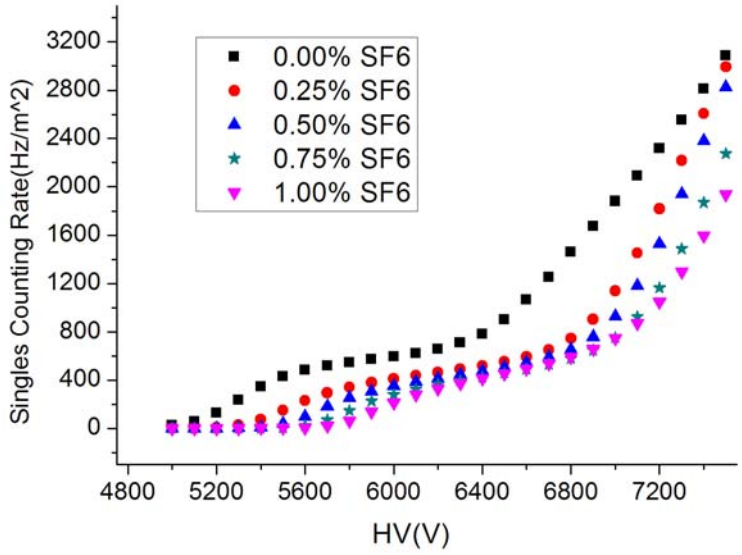

图 6. 8 在 Ar/R134a/Isobutane = 75/21/4 的基本气体中加入不同量 SF_6 的单计数率曲线

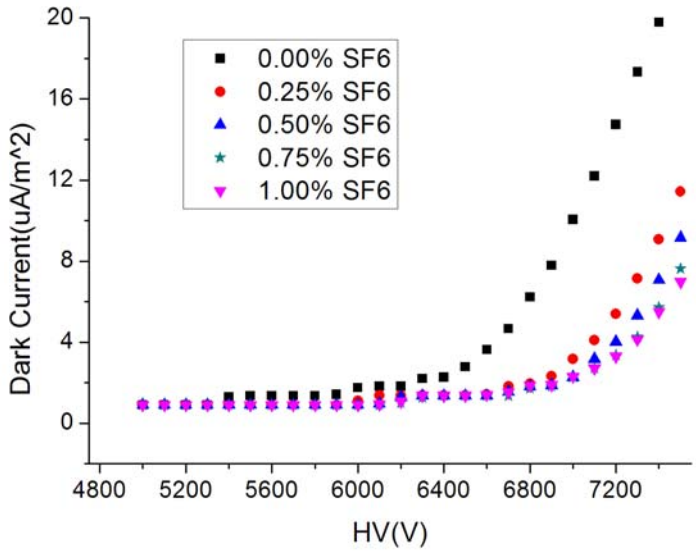

图 6. 9 在 Ar/R134a/Isobutane = 75/21/4 的基本气体中加入不同量 SF_6 的暗电流曲线

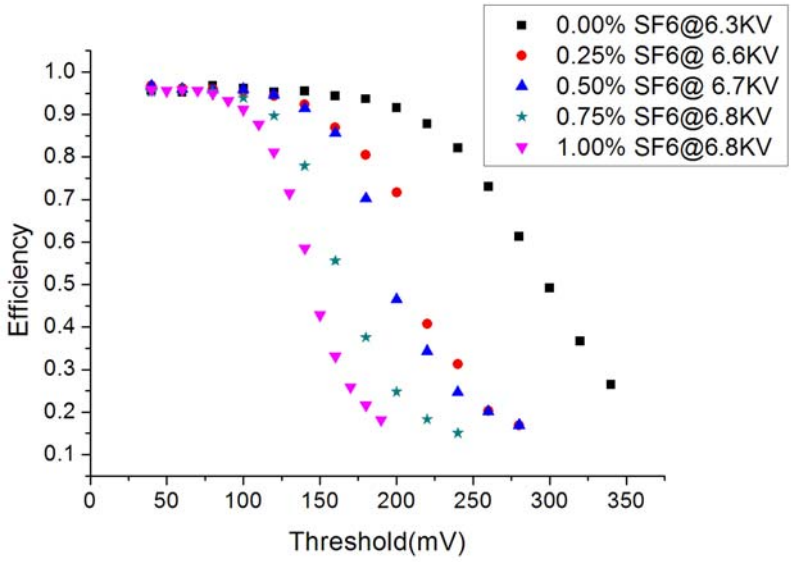

图 6. 10 工作在最佳高压的 RPC 在不同 SF_6 气体下，效率随甄别阈的变化曲线

6.4.2 固定 0.5% SF_6 的气体

从上一节中可以得到，SF_6 的含量只要达到 0.25%以上，即可以有效地发挥出它强大的淬灭作用。要研究 SF_6 究竟能发挥多大的作用，还需要研究它对不同混合气体的影响。这里我们把 SF_6 的比份固定为 0.5%，isobutane 固定为 3.5%，改变 Ar 比份为 60%、65%、70%、75%，R134a 的比份作相应调整，测试并比较 RPC 三个技术指标效率、单计数率以及暗电流的曲线，分别如图 6. 11，图 6. 12，图 6. 13 所示。这里 isobutane 的含量从 4%降到了 3.5%，目的是为了保证 Ar 和 R134a 的含量与 6.3 节一致，方便两者之间的比较。而从 6.2 节可以得到，Isobutane 含量的细微改变并不会使效率、单计数率、暗电流曲线产生明显的变化，因此不影响我们的比较。仍然把效率达到 95%的高压定义为 V_1，把单计数率和暗电流开始急剧上升的高压定义为 V_2，RPC 的合理工作高压在 V_1 到 V_2 的区间内，最优工作高压为两者的中点。 表 6. 2 列出了 V_1、V_2 以及工作高压的选择范围值 R，最优工作高压 V_O 以及 V_O 下的 RPC 性能。与没有加 SF_6 的表 6. 1 相比较，加了 SF_6 以后，工作高压的选择范围增大了，特别是 75% Ar 的情况下，从原来的 200 V 增加到了现在的 500 V。 最佳工作高压普遍上升了 200-300 V，而在此高压下的 RPC 效率仍然基本不变，单计数率和暗电流得到了明显的压制，分别只有表 6. 1 的 2/3 和 1/2。

在表 6. 2 中，还有一个比较有意思的现象是，随着 Ar 比份的升高，最佳工作高压下的暗电流并没有升高而是保持了稳定，而单计数率则反而下降了。这跟工作高压的降低有很大的关系。

另外，从图 6. 11 来看，效率曲线仍然随着气体中 Ar 含量的增加而左偏，偏移的速率约为 80V/1%，与 6.3 节中 70V/1%基本吻合，验证了上面的结果。

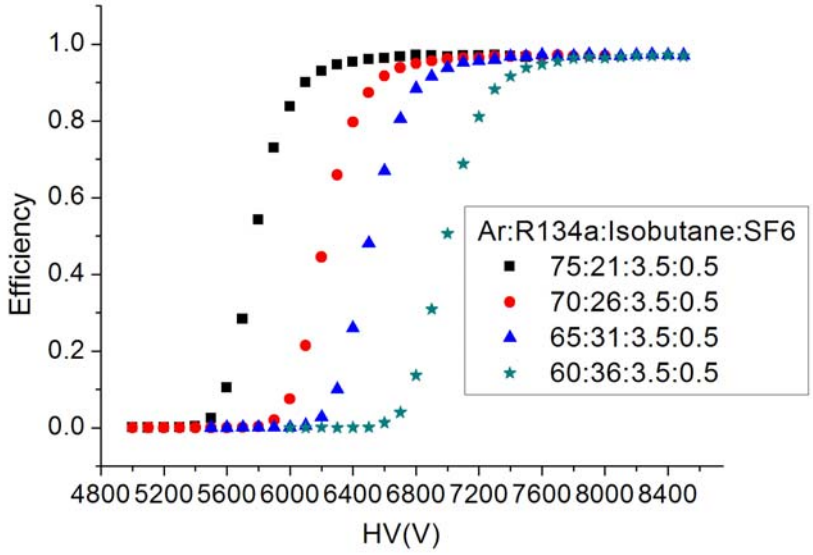

图 6. 11 SF_6 0.5%，isobutane 3.5%时不同 Ar 含量气体的效率曲线

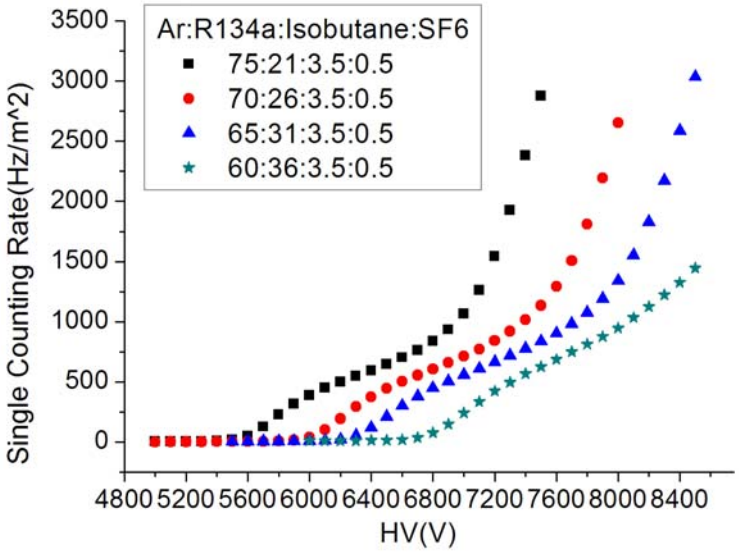

图 6. 12 SF_6 0.5%，isobutane 3.5%时不同 Ar 气体的单计数率曲线

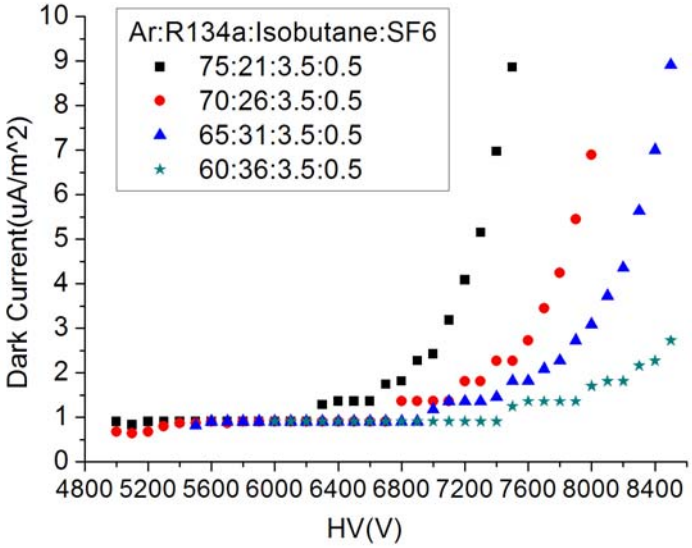

图 6. 13 SF_6 0.5%，isobutane 3.5%时不同 Ar 气体的暗电流曲线

表 6. 2 SF_6 0.5%, isobutane 3.5%时，不同 Ar 下工作高压的选择以及 RPC 性能

Gas mixture (Ar:R134a:Iso-butane:SF_6)	V_1(kV)	V_2(kV)	$R=V_2-V_1$ (kV)	V_O(kV)	Efficiency (%)	SCR (kHz/m^2)	Dark current ($\mu A/m^2$)
60:36:3.5:0.5	7.7	8.2	0.5	7.9	96.6±0.20	0.88	1.4
65:31:3.5:0.5	7.1	7.7	0.6	7.4	96.7±0.18	0.77	1.5
70:26:3.5:0.5	6.9	7.4	0.5	7.1	96.3±0.12	0.77	1.4
75:21:3.5:0.5	6.4	6.9	0.5	6.6	96.3±0.17	0.70	1.4

6.5 本章小结

本章内容主要是研究各种工作气体对大亚湾 RPC 的影响和在不同工作气体下 RPC 性能的变化规律以及 RPC 工作高压的选择。首先研究了 isobutane 在工作气体中的作用和影响，通过实验证明了把 isobutane 降到 4%是可行的，并得到了 isobutane 在工作气体中的含量下限为 2%。提出了合理选择 RPC 工作高压的原则，在保证效率的同时降低单计数率和暗电流，并列出了各种常用气体比分下的最佳工作高压，可以对将来的实验起到参考作用。研究了 Ar 对 RPC 工作高压的影响，Ar 每增加 1%，RPC 效率曲线左偏约 70V。尝试在传统的 RPC 混合气体中加入少量的 SF_6 来提升 RPC 性能，研究了 SF_6 的作用特性，只要在混合气体中加入 0.25%以上的 SF_6 即可以有效地发挥淬灭作用。加 0.5% SF_6 情况下， RPC 的效率保持不变，单计数率和暗电流则压低到原来的 2/3 和 1/2，使 RPC 拥有了更好的性能。

第七章 大亚湾 RPC 质量控制数据库

数据库（Database），是一种能够进行自动查询和修改的数据集[48]。数据库有很多种类型，从最简单的存储有各种数据的表格到能够进行海量数据存储的大型数据库系统都在各个方面得到了广泛的应用。在过去的十几年中，随着开放源代码运动的蓬勃发展，人们把越来越多的注意力集中到一个称为 MySQL 的数据库系统上。这个数据库系统可以在 Internet 上免费使用，并且拥有极高的安全性和稳定性。如今 MySQL 已经成为世界上最流行的开源数据库管理系统。大亚湾正是采用了 MySQL 数据库来管理 RPC 批量生产和测试过程中的实验数据，并在实验结果的分析中发挥了强大的威力。本章将重点介绍大亚湾 RPC 数据库的设计和应用功能。

7.1 数据库简介

首先了解一下数据库的基本知识。数据库是按照数据结构来组织、存储和管理数据的仓库，是一种能够进行自动查询和修改的数据集。在日常工作中，常常需要把某些相关的数据放进这样“仓库”，并根据管理的需要进行相应的处理。例如，学校和老师常常要把本校学生的基本情况(学号、姓名、年龄、性别、家庭住址、考试成绩等)存放在表中，这张表就可以看成是一个数据库。有了这个"数据仓库"就可以根据需要随时查询某学生的基本情况，也可以查询某次期末考试成绩在某个范围内的学生人数等等。这些工作如果都能在计算机上自动进行，那将会带来极大的方便。此外，在管理、仓库管理、生产管理中也需要建立众多的这种“数据库”，使其可以利用计算机实现财务、仓库、生产的自动化管理。

7.1.1 基本结构

数据库的基本结构分三个层次[49]，反映了观察数据库的三种不同角度。

(1)物理数据层

它是数据库的最内层，是物理存贮设备上实际存储的数据的集合。这些数据是原始数据，是用户加工的对象，由内部模式描述的指令操作处理的位串、字符和字组成。

(2)概念数据层

它是数据库的中间一层，是数据库的整体逻辑表示。指出了每个数据的逻辑定义及数据间的逻辑联系，是存贮记录的集合。它所涉及的是数据库所有对象的逻辑关系，而不是它们的物理情况，是数据库管理员概念下的数据库。

(3)逻辑数据层

它是用户所看到和使用的数据库，表示了一个或一些特定用户使用的数据集合，即逻辑记录的集合。数据库不同层次之间的联系是通过映射进行转换的。

7.1.2 分类

数据库通常分为层次式数据库、网络式数据库和关系式数据库三种。而不同的数据库是按不同的数据结构来联系和组织的。

层次式数据模型实质上是一种有根结点的定向有序树。例如一个高校的人员组织结构，这个组织结构像一棵树，校部就是树根(称为根结点)，各系、专业、教师、学生等为枝点(称为结点)，树根与枝点之间的联系称为边，树根与边之比为 1:N，即树根只有一个，树枝有 N 个。按照层次模型建立的数据库系统称为层次模型数据库系统。

按照网状数据结构建立的数据库系统称为网状数据库系统，用数学方法可将网状数据结构转化为层次数据结构。

关系式数据结构把一些复杂的数据结构归结为简单的二元关系(即二维表格形式)。例如某单位的职工关系就是一个二元关系。由关系数据结构组成的数据库系统被称为关系数据库系统。在关系数据库中，对数据的操作几乎全部建立在一个或多个关系表格上，通过对这些关系表格的分类、合并、连接或选取等运算来实现数据的管理。

网状数据库和层次数据库已经很好地解决了数据的集中和共享问题，但是在数据独立性和抽象级别上仍有很大欠缺。用户在对这两种数据库进行存取时，仍然需要明确数据的存储结构，指出存取路径。而后来出现的关系数据库较好地解决了这些问题。

7.1.3 查询语言

SQL(Structured Query Language)语言[50]是 1974 年由 IBM 的 RayBoyce 和 DonChamberlin 提出的。SQL 语言的功能包括查询、操纵、定义和控制，是一个综合的、通用的关系数据库语言，同时又是一种高度非过程化的语言，只要求用户

指出做什么而不需要指出怎么做。SQL 集成实现了数据库生命周期中的全部操作。SQL 提供了与关系数据库进行交互的方法，它可以与标准的编程语言一起工作。自产生之日起，SQL 语言便成了检验关系数据库的试金石，而 SQL 语言标准的每一次变更都指导着关系数据库产品的发展方向。

SQL 语言包含 4 个部分：

- 数据定义语言(DDL)，例如：CREATE、DROP、ALTER 等语句。
- 数据操作语言(DML)，例如：INSERT（插入）、UPDATE（修改）、DELETE（删除）语句。
- 数据查询语言(DQL)，例如：SELECT 语句。
- 数据控制语言(DCL)，例如：GRANT、REVOKE、COMMIT、ROLLBACK 等语句。

用来进行程序设计的语句主要是：数据定义语言(DDL)，数据操作语言(DML)和数据控制语言(DCL)。

7.2 数据库软件

常用的数据库软件主要有 IBM DB2，Oracle，Sybase，SQL Server，PostgreSQL 以及 MySQL 等。MySQL[51]是一个小型关系型数据库管理系统，开发者为瑞典 MySQL AB 公司。在 2008 年 1 月 16 号被 Sun 公司收购。由于其体积小、速度快、总体拥有成本低，尤其是开放源码这一特点，目前 MySQL 被广泛地应用在 Internet 上的中小型网站中，我们也采用它建立了 RPC 系统的数据库。下面主要针对 MySQL 作一下简单的介绍。

7.2.1 MySQL 体系结构

MySQL 建立在一个层次体系结构上，由主子系统和辅助部件组成，他们之间相互配合，读取、分析数据和执行查询，并且可以高速返回查询的结果。MySQL 包含五个主子系统，分别是：

- 查询引擎
- 存储管理器
- 缓冲管理器
- 事物管理器

◆ 恢复管理器

查询引擎又包含三个相互关联的部件：语法分析器、查询优化器和执行部件。语法分析器接收 SQL 指令后调用相关的程序把指令分解成可以让 MySQL 引擎识别的一种形式。同时语法分析器还可以对引用的目标对象的权限进行检查。然后查询优化器将优化语法句子，使之更有效地让执行部件使用。最后执行部件解释执行计划，并且根据接收到的信息向其他部件发出取出记录的请求。

存储管理器与操作系统相互配合，有效地向磁盘存入数据。利用 MySQL 函数库，存储管理器可以把用户表、索引以及日志文件中的所有数据存入磁盘。

缓冲管理器负责处理所有在查询引擎和存储管理器数据请求中引起的内存管理问题。MySQL 优先使用内存来缓存返回的结果集合，而不是直接向存储管理器发出请求。

事务管理器的作用是促进数据访问的并发性。这个子系统提供一个加锁工具，保证同时访问的多个用户协调地访问数据而不至于互相干扰。

恢复管理器的功能是防止数据丢失，对数据进行备份保存副本以便随时提取。另外它还负责将数据库中修改数据和其他重要事件的指令记入日志文件。

除了五个主子系统之外，MySQL 体系结构还包含下面两个辅助部件：

◆ 过程管理器

◆ 函数库

过程管理器有两个功能。一是通过与客户连接的网络管理模块管理用户连接。二是通过多线程、线程加锁和执行线程安全操作模块，使竞争性的任务和过程同步。函数库包含被其他所有子系统使用的通用例程。它包含字符串处理程序、排序操作程序以及内存管理和文件 I/O 等操作系统的特定功能。

7.2.2 MySQL 索引

索引[52]是一种特殊的文件，它包含着对数据表里所有记录的引用指针。索引指向数据库中具体数据所在的一个位置，同时在列上创建一个索引可以排列该列上的信息。索引在多表查询中显得非常强大，能极高地提高搜索的效率。但索引也不是万能的，它会使数据修改操作变慢。每修改数据记录，索引就必须刷新一次。另外，索引还会在硬盘上占用相当大的空间。因此，合理设置索引是设计数据库时需要考虑的问题之一。普遍的做法是只为最经常查询和最经常排序的数据

列建立索引。

一般地，MySQL 索引可以分为普通索引、唯一索引和主索引三大类。普通索引(由关键字 KEY 或 INDEX 定义的索引)的唯一任务是加快对数据的访问速度。因此，应该只为那些最经常出现在查询条件(WHERE column = ...)或排序条件(ORDER BY column)中的数据列创建索引。普通索引允许被索引的数据列包含重复的值。比如说，因为人有可能同名，所以同一个姓名在同一个"学生姓名"数据表里可能出现两次或更多次。唯一索引（用关键字 UNIQUE 定义）设定了该数据列里面的值是各不相同的，例如“学号”。当新纪录插入数据表时，MySQL 会自动检查记录的值是否已经存在，如果是，MySQL 将拒绝插入这条记录。这样的好处是可以避免信息的重复。主索引也是唯一索引的一种，是为数据表中的主键字段准备的一个索引。它与唯一索引的唯一区别是，它在定义时使用的关键字是 PRIMARY 而不是 UNIQUE。

7.2.3 Apache 与 PHP

MySQL+Apache+PHP 被认为是当今开发数据库的黄金组合。

Apache[53]是世界使用排名第一的 Web 服务器软件。它可以运行在几乎所有广泛使用的计算机平台上，由于其跨平台和安全性被广泛使用，是最流行的 Web 服务器端软件之一。Apache 的特点是简单、速度快、性能稳定，并且它也是自由软件，可以在 Internet 上免费下载。利用 Apache 作为数据库的 Web 服务器，使之能通过网络给用户提供服务，无疑能使 MySQL 如虎添翼。

PHP[54]是超级文本预处理语言（PHP:Hypertext Preprocessor）的缩写。PHP 是一种 HTML 内嵌式的语言，PHP 是一种在服务器端执行的嵌入 HTML 文档的脚本语言，语言的风格类似于 C 语言，深受网站编程人员的欢迎。PHP 独特的语法混合了 C、Java、Perl 以及 PHP 自创新的语法。它可以比 CGI 或者 Perl 更快速的执行动态网页。PHP 具有非常强大的功能，所有的 CGI 或者 JavaScript 的功能 PHP 都能实现，而且支持几乎所有流行的数据库以及操作系统。PHP 支持各种操作系统，在 Unix、Linux 和 Windows 平台下都可以运行。

7.2.4 数据库安装与配置

了解了数据库的基本知识之后，我们面临的首要问题是如何在自己的电脑上架设一个数据库，并使之通过网络给用户提供服务。

通过前面一节的介绍，我们知道 MySQL 和 Apache 软件都是可以通过 Internet 免费下载的。我们可以分别安装这两个软件，并按照说明对它们进行一一配置。如果是 Windows 用户，还选择一种更加快速，更加“傻瓜”的方式来一次性安装并配置它们。Internet 上流行的 Apache+PHP+MySQL 服务器套件为我们提供了这个方便。

这个套件可以在 http://www.newhua.com/soft/75600.htm 上下载到。下载后只要双击批处理安装文件，即可以完成所有软件的安装以及大部分的配置工作。MySQL 管理员用户名一般为 root，需要注意的是初次安装后的密码往往为空，这是很危险的。我们需要手动给 root 设置密码。打开 Windows 的命令提示符窗口，进入 MySQL 的安装目录(例如 /usr/local/mysql/bin)，输入命令 mysqladmin –uroot –p password ‘<new-password>’ 后，单引号里面的新密码即生效。此外还需要手动进行配置的是/usr/www/html/phpMyadmin/子目录下的 config.inc.php 文件，将里面设置 IP 的地方设置为服务器主机的 IP 地址或者’localhost’。搜索该文件里的’password’关键词，把涉及到密码的地方，设置为刚才所设的 MySQL 密码。这样，一个数据库管理软件 phpMyadmin 也能够工作了（可以在 IE 浏览器输入地址 http://localhost/phpmyadmin/）。它将给以后的工作带来极大的方便。

7.3 RPC 数据库设计

数据库本质上是由一个个存放不同数据的表格构成的。数据库的设计就是数据表格的设计，这是一个对数据进行组织化和结构化的过程。一个规范的数据库，要求有简洁、清晰的表结构，良好的可扩展性和较高的数据存储效率。在以后的数据维护中，不会发生插入（insert）、删除（delete）和更新（update）时的异常。在设计表格之前，我们要了解在 RPC 的生产和测试过程中究竟会产生哪些数据，需要记录哪些东西，然后把这些数据分放在不同的表格里。RPC 数据库包含的数据大致可以分成 bakelite（阻性板相关的数据）、RPC（RPC 裸室相关的数据）以及 module（RPC 模块相关的数据）三大模块。

7.3.1 Bakelite

Bakelite 模块里面包含的数据有两个产生来源：体电阻率测试和面电阻率测试。

体电阻率测试环节的数据有：测试日期，环境温度、湿度，测试高压和九个

测试点的电流等直接得到的数据，还有电流、体电阻率、换算到 20℃时体电阻率的平均值、最大值、最小值这几个通过分析或计算得到的数据。

面电阻率测试的数据比较少，只有两个测试点的石墨层面电阻。

给每块阻性板一个唯一的 ID，再加上前面的数据就构成了阻性板的所有数据。显然 ID 应该是主键，因为它是唯一的。这些数据按数据来源分存在两个表格'bakelite_res'和'bakelite_gra'里。这样做的好处是由于体电阻率和面电阻率在实际中是不同时间段测试的（面电阻率是阻性板喷好石墨准备制作 RPC 时才测的），数据当然也不是同时产生和输入数据库的，如果把它们放在同一张表格里面，那么 insert 体电阻率数据的时候，面电阻率相关的字段会出现空白。下次 insert 面电阻率数据时还需要检查体电阻率数据是否已经输入，否则直接 insert 会操作失败。另外当我们因为某种原因需要删除一个阻性板错误的面电阻率记录时，也会同时删除它的体电阻率信息，显然这是我们不愿意看到的。所以把不同来源的数据分至不同的数据表格是很有必要的。其他表格如 RPC 裸室数据表格以及模块数据表格的设计也都体现了这个原则。

7.3.2 RPC

RPC 裸室相关的数据包括 RPC 材料，Training，宇宙线测试以及 RPC 状态几个部分。

RPC 材料由一个表格描述，表名为'rpc_mat'。主要有三个字段 'rpc_id'、'bake_id_a'、'bake_id_b'组成，分别代表 RPC 的唯一编号（主键）和两块阻性板的编号。有了这个表格就可以得到 RPC 是由哪两块阻性板制作而成的，并且可以通过取出阻性板编号进一步在阻性板相关的表格里查询到它们的体电阻率和面电阻率信息。通过这个表格就把 RPC 和阻性板的信息结合在了一起。

Training 相关的数据比较复杂，涉及的表格有'rpc_tra'、'tra_cur'、'tra_no'和'tra_info'。这是由 training 数据的特点决定的。RPC 在 training 的时候一般是 8 块一组，training 的时间大概为 48 小时。每间隔一定的时间如两小时，由实验员记录一下数据。数据主要有日期、时间、温度、湿度、大气压以及正负高压、电流。这些数据都保存在一个数据文件上，最后由程序读入填到数据库相关的表格里。'rpc_tra'表格的字段有 RPC 编号（主键）、training 数据文件名以及在该文件里该 RPC 的序列号（1-8）组成。'tra_cur'表格存放的是每次记录的正负高压和电

流。每次 training 的时候，人工记录 training 数据的时间间隔和次数不一定是相同的，为了应对这种情况，读取 training 文件入库的时候会给每次记录一个流水号。这样在查询 training 信息的时候，只要知道一块 RPC 的起止流水号和序号，就能知道每次记录的高压和电流数值了。流水号、序号（联合主键）以及正负高压电流都存放在'tra_cur'表格里。而'tra_info'就是记录每个 training 文件的起止流水号的，以 training 数据文件名作为主键。它还记录了起止时间和总的 training 小时数。最后一个表格'tra_no'，是描述每次记录数据时的环境参数的，以流水号为主键。这样如果要查询一块 RPC 的 training 细节，可以按如下顺序查表：先在'rpc_tra'表格里查到 training 文件名以及序号。然后在表'tra_info'里，根据 training 文件名查到起始的流水号。再用流水号和序号在表'tra_cur'里查到对应的高压和电流。最后用流水号在表'tra_no'里得到环境参数。

RPC 宇宙线测试的数据存在两个表格里：'rpc_run'和'rpc_per'。每次宇宙线测试都会产生一个数据文件，里面包含同时测试的几块 RPC 的测试数据。表 'rpc_run' 保存了测试时的环境参数，起止时间等，以数据文件名作为主键。表'rpc_per'则有序地保存了数据文件里面的内容。包括 6kV 到 9kV 的 3 重符合计数，4 重符合计数，效率，单计数率，暗电流等。它的主键是 RPC 编号和数据文件名。

描述 RPC 状态的两个表格是'rpc_ass'和'rpc_style'。两个表的主键都是 RPC 编号。表'rpc_ass'除了主键外只有一个字段，记录 RPC 是否已经安装成模块。
表'rpc_style'除了主键外也只有一个字段，记录 RPC 的型号，A 型或 B 型。

7.3.3 Module

RPC 模块相关的数据包括两部分内容：组装数据和测试数据。

组装的数据用一个'mod_ass'表来管理。模块的唯一编号作为该表的主键，其他包含的字段还有组装的日期，温度，湿度以及模块里面 8 个 RPC 裸室的编号。

模块测试的表格还在进一步完善中。

7.4 RPC 数据库功能

上一节讲的是数据库表格的设计，目的是把所有有用的数据有组织地存放起来。但这些数据是不能直接呈现给用户的，也不可能让用户使用 SQL 语言去操作数据库。用户的需求是一个简洁友好的界面，通过点击鼠标或者简单的键盘输入就能够得到自己想要的各种数据。高级用户例如管理员还需要对数据库进行增加、

删除、修改记录等高级操作。用 Apache 建立一个可以通过 Internet 访问的网站，并利用 PHP 中 MySQL 相关的函数编写各种脚本程序可以实现上述的功能。大亚湾 RPC 数据库网站的地址是 http://rpc.ihep.ac.cn，可以在高能所内部进行访问。下面介绍一下主要功能。

7.4.1 查询与显示功能

RPC 数据库设计了多种方式的查询以满足不同情形下的需要。下面以 RPC 裸室的查询为例进行说明。图 7. 1 是 RPC 裸室查询的界面，它包含了三种方式的查询。

第一种方式是按编号查询。适用的情形是用户已知需要查询的 RPC 编号。这种情况下用户直接输入编号无疑是最为直接有效的查询方法。后台程序会根据用户提交的编号在 MySQL 数据库的相应表格里进行查询，并把结果组织好，以一个比较清晰的形式（图或者表）呈现给用户。

第二种方式是按生产日期查询。很多时候用户并不知道具体的编号或者需要查询生产日期在某个时间段内的每个 RPC，这样按生产日期查询是比较方便的。用户可以按年月日选择时间段进行提交。后台的程序会分析用户的输入信息并连接 MySQL 数据库进行查询。然后把符合条件的所有编号都呈现出来，用户可以点击编号上的超链接分别查看相关的内容。

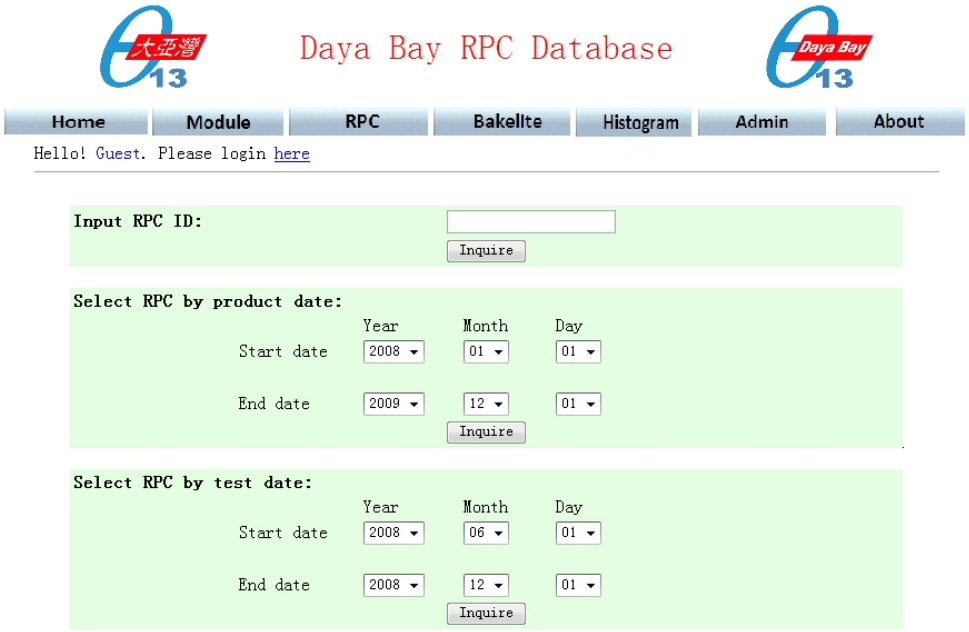

图 7. 1 RPC 查询界面，其中包含了三种查询方式

第三种方式是按测试日期查询。这种方式跟第二种查询方式比较相似，唯一不同的是用户选择的日期是测试的日期。

查询的结果以图表结合的方式呈现给用户，使用户得到完整、简洁又清晰的信息。图 7.2 就是编号为'080918490S'的 RPC 的查询结果。它包含了 RPC 的基本信息、training 信息、宇宙线测试信息以及测试结果等。如果点击基本信息中的阻性板编号，还可以链接到阻性板查询的程序，最后得到阻性板的查询结果，如图 7.3 所示。阻性板的查询结果里主要包含体电阻率和面电阻率测试的数据。

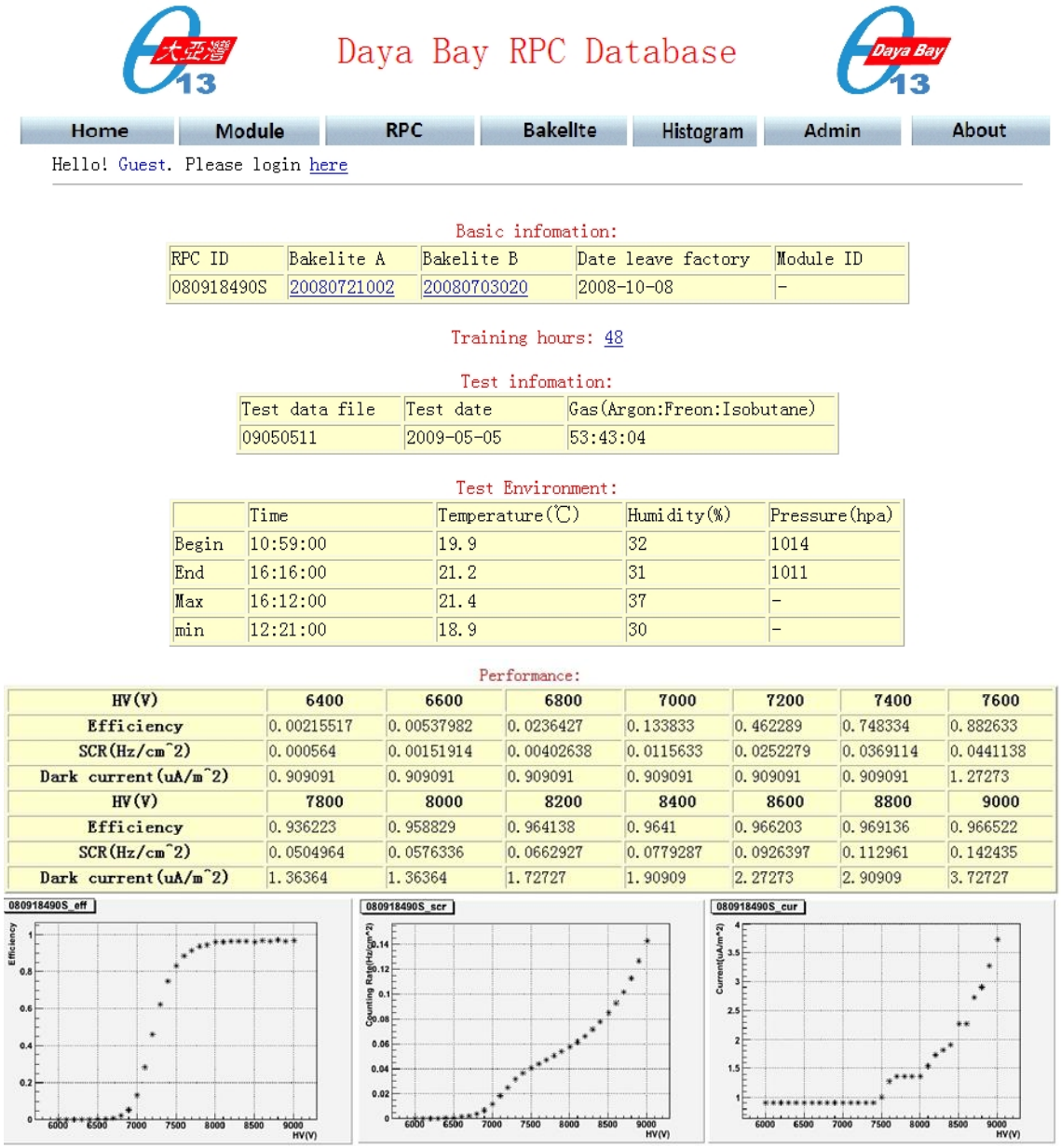

图 7.2 RPC 的查询结果显示

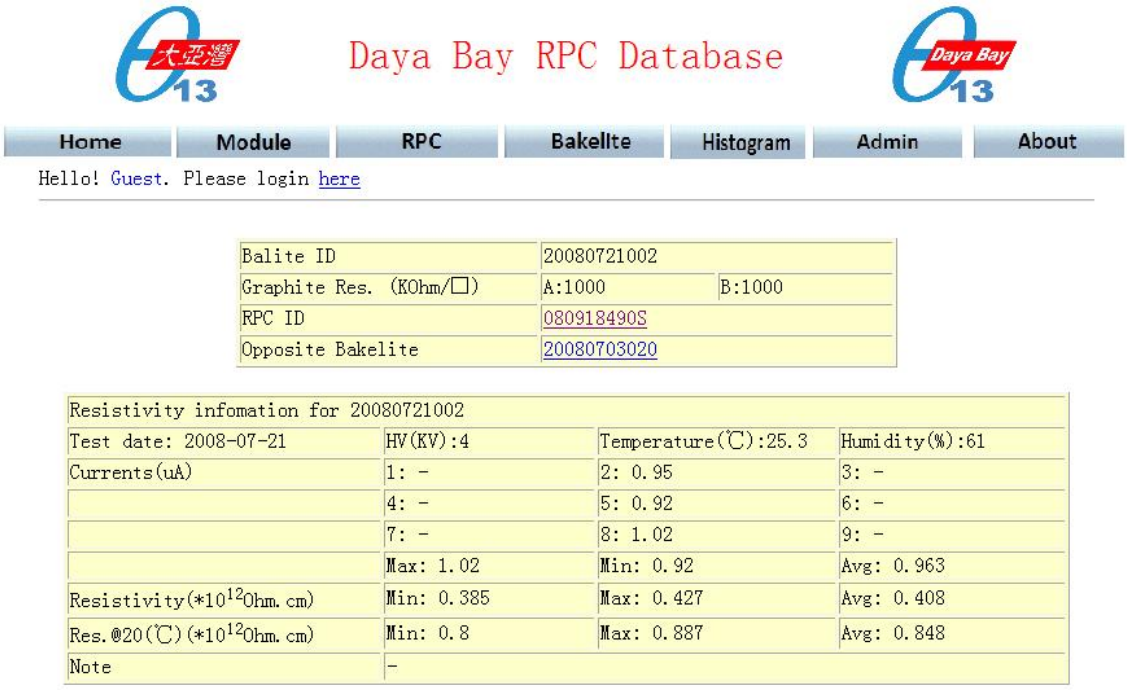

图 7.3 阻性板的查询结果显示

7.4.2 统计功能

除了查询单个阻性板、RPC 和模块的信息外，很多时候用户还需要对结果进行统计以便了解总体上的情况。例如需要查询生产日期在 2009 年 2 月的所有 RPC 裸室的平均效率时，如果对它们进行单独查询再根据结果计算平均值就显得非常的不方便。针对这方面的要求，专门开发了统计功能，点击主页上的'Histogram'标签即可以进入统计界面，如图 7.4 所示。上面包含了两部分内容，一个是对 RPC 裸室作统计，一个是对阻性板作统计。

对 RPC 裸室的统计对象是效率、单计数率和暗电流，用户可以打钩选择其中一项或者多项。可以选择不同生产日期（product date）、测试日期（test date）范围的 RPC 作为统计样本。还可以指定不同测试高压（HV: 6kV – 9kV）和 RPC 裸室的型号（size: big, small, both）。将来当 RPC 安装到大亚湾后，还可以把 RPC 分成不同的实验点（site: near, far, Lin'ao, all sites）分别进行统计。另外还可以指定所作直方图的 Bin 数目，以便根据不同的需要显示不同的细节程度。如果不指定，程序会根据统计量的多少自动选择合适的 Bin 作图。图 7.5 就是在线生成的直方图的一个例子。它统计的是生产日期从 2008-1-1 到 2009-12-1 之间，测试日

期也是 2008-1-1 到 2009-12-1 之间的所有 Big 型 RPC 在 8400V 高压下的效率统计分布。统计对象的范围从上方的表格里可以看出来。

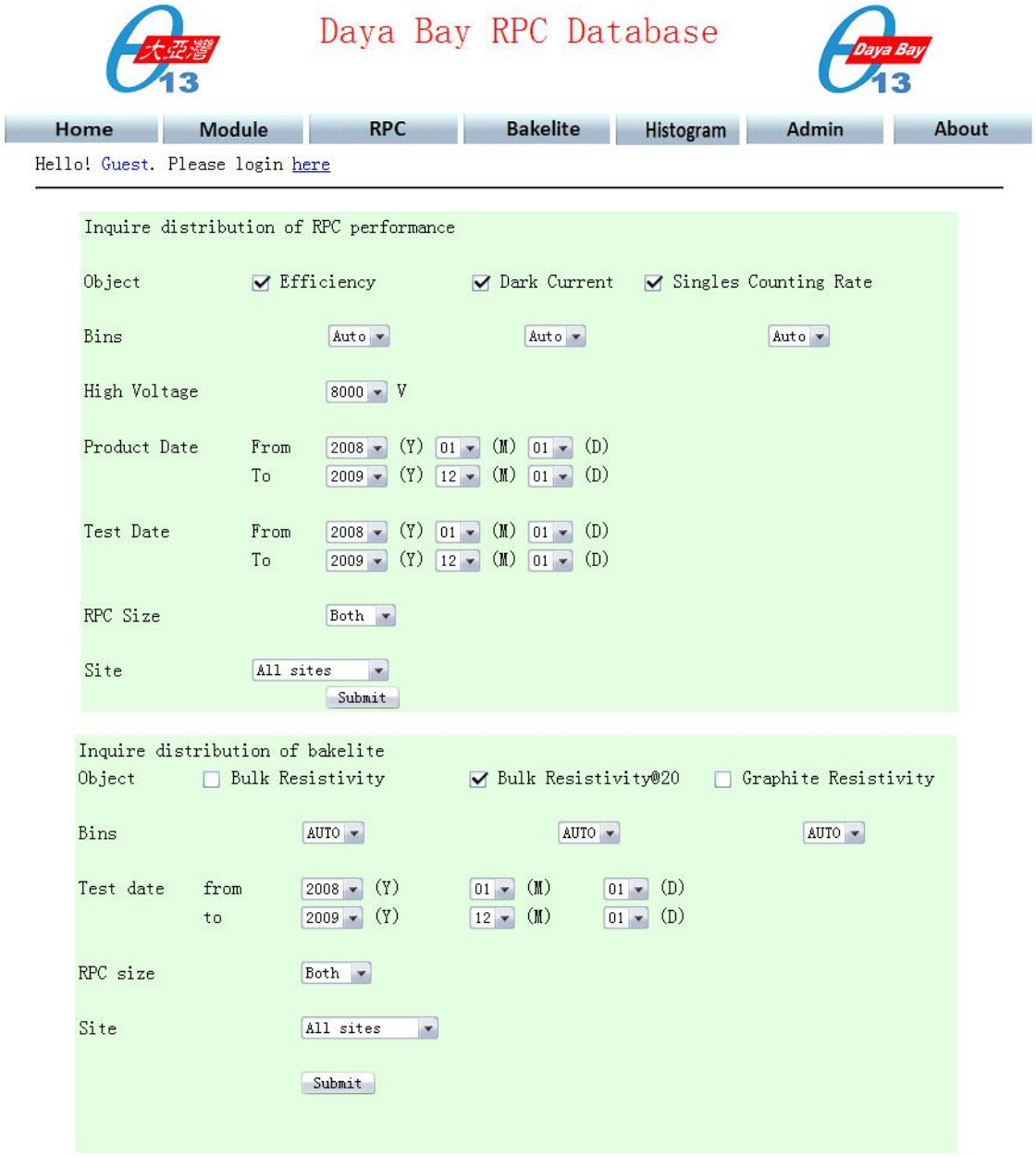

图 7. 4 RPC 裸室和阻性板的统计页面

Histogram(s) for Big size(s) RPCs :			
Product date from	2008-01-01	to	2009-12-01
Test date from	2008-01-01	to	2009-12-01
Assembled in	All	site(s)	
Operated at	8400	Volts	

Pass rate for some QC Conditions

Efficiency	>93%	>94%	>95%	>96%
Amount	747	738	701	566
Rate	94%	93%	88%	71%

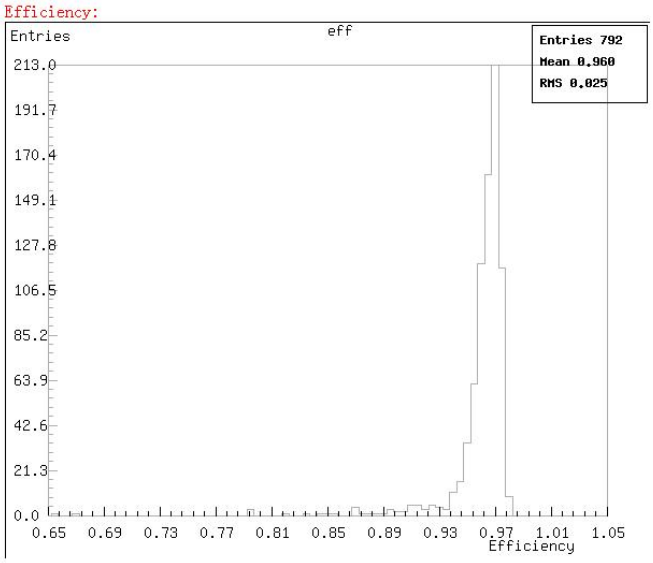

图 7.5 在线生成的效率统计直方图

阻性板统计的对象是体电阻率和石墨层的面电阻率。其中体电阻率又包括实测得到的体电阻率和换算成 20℃时候的体电阻率。用户可以选择不同测试日期范围的阻性板最为统计的样本。用户还可以指定统计用在哪种型号 RPC 上的阻性板（RPC size：big，small）。将来当 RPC 安装到大亚湾后，还可以把阻性板分成不同的实验点（site: near, far, Lin'ao, all sites）分别进行统计。和 RPC 裸室的统计一样，这里也可以根据需要指定不同的分 Bin 数量以便显示不同的细节程度。图 7.6 是在线生成的阻性板体电阻率直方图的一个例子。从上方的表格里可以看到，它统计的范围是测试时期从 2008-1-1 到 2009-12-1 日之间，用于两种型号 RPC 的，用于所有实验点的所有阻性板。

Histogram(s) for Bakelites			
Test date from	20080101	to	20091201
Used in	both	RPCs	
Assembled in	all	site(s)	

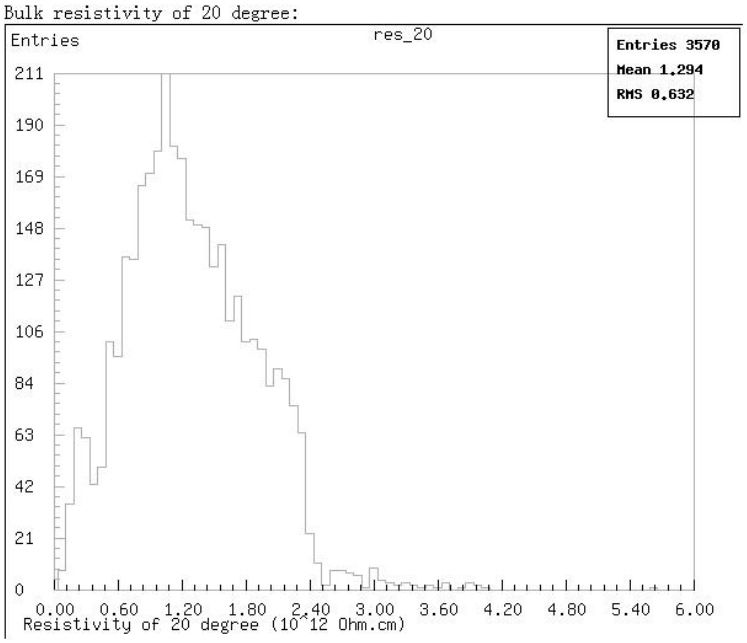

图 7.6 在线生成的阻性板体电阻率直方图

7.4.3 数据采集功能

数据采集是实验过程中的重要环节。在 7.3 节中已经介绍了数据库所包含的实验数据。数据采集就是要把这些数据有序而完整地录入到数据库的表格里去。根据实验数据的特点，设计了两种方式进行数据的采集和入库。

第一种方式是手动填表输入数据。这些数据一般是事先填在纸质表格中的。数据的来源也一般是手动测试而得的。例如阻性板的体电阻率测试所得的数据，RPC 裸室的出厂信息，还有 RPC 宇宙线测试时手动记录的环境参数及测试时间等。例如图 7.7 就是采集 RPC 宇宙线测试的环境参数的窗口。表格要求填入数据文件，测试起始的时间、温度、湿度、大气压以及期间的最高最低温湿度和出现最高最低温度的时间，最后如果有什么需要说明的也可以填到相应的位置。

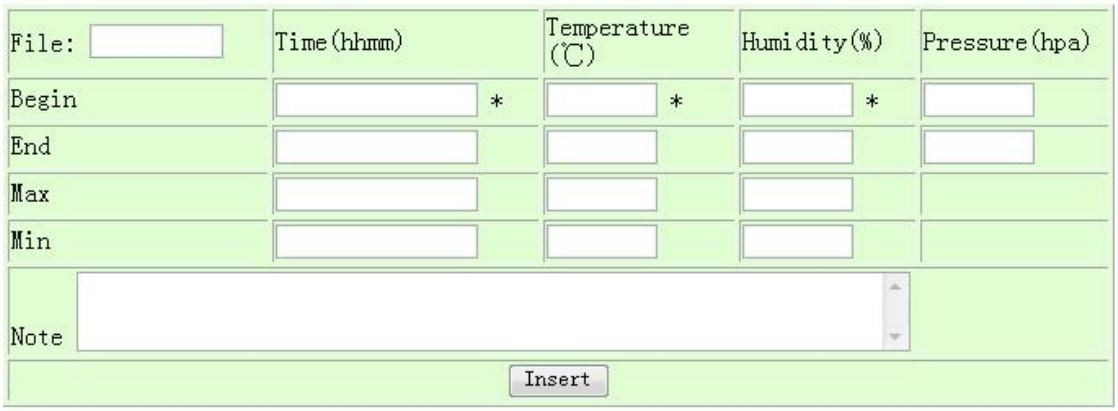

图 7.7 手动输入 RPC 宇宙线测试的环境参数

第二种数据采集的方式是利用程序自动读取数据文件。这些数据的特点是数据量大，有专门的数据文件存放。例如 RPC 宇宙线测试所得的实验数据以及 training 时的暗电流数据。数据采集时可以指定数据文件名一个一个的读取或者指定文件名的范围（数据文件名一般按日期取名）批量读取，也可以指定文件夹读取整个文件夹的数据文件。利用程序自动读取数据大大提高了数据采集的效率，也避免了由于人工采集带来的错误输入。

7.4.4 权限管理功能

不同的用户享有不同的权限。对于普通用户，只有查询和统计的功能是开放的。其他对数据库的操作例如数据采集入库则是不开放的，这是出于安全性的考虑。数据库设计了三个用户组：普通用户、管理员和超级管理员。匿名登录的用户默认为普通用户，只对查询和统计功能有使用权。如果要使用其他功能，必须在相关注册页面注册管理员，并得到超级管理员的允许。超级管理员除了管理员的权限之外，还可以对用户的权限进行设置。

7.4.5 其他管理功能

除了数据采集之外，管理员还可以对数据进行编辑修改和删除。因为在数据采集阶段，有一部分数据是通过手动输入的，这就难以避免的会出现失误。另外在其他记录数据的环节也会出现如抄错编号等情况，造成数据对不上。所以这两个功能的设置也是非常实用的，目前正在进一步完善中。

7.5 本章小结

本章的主要内容大亚湾 RPC 质量控制数据库。从数据库的基础知识介绍开始，

重点讲述了 RPC 数据库的设计以及各种实用功能。需要说明的是，RPC 数据库的开发是一个逐步进行的过程，随着 RPC 批量生产和测试的进行，不断产生新的数据，也不断产生新的查询要求，所以期间作了许多改进和完善的工作，并且在持续更新中。相信在将来大亚湾的正式运行中，这里的第一手数据将会是我们的重要参考。

第八章 RPC 系统效率的模拟

大亚湾三个实验厅的 RPC 模块将被安装成 9 × 9 个（远点）和 6 × 9 个（两个近点）的模块阵列。在将来的运行过程中，RPC 难免会出现各种故障。本章将通过 Geant4 模拟的方式，分析 RPC 出现故障时，对 RPC 系统整体效率的影响。

8.1 Geant4 和 G4dyb 简介

8.1.1 Geant4

Geant4 程序包[55]是基于 C++语言编写的面向对象的探测器模拟软件包，包含了非常丰富的物理过程，在高能物理、核物理、加速器物理、核医学、宇宙学等学科中有着广泛的应用。

Geant4 模拟涵盖了几何结构、物质材料、事例产生、物理相互过程、径迹跟踪、图形显示等。其软件包按功能模块化，把耦合关系比较紧密的归类于一个模块。如图 8. 1 所示。下面简单介绍 Geant4 各个模块的功能[56]。

◆ Run 和 Event

这两个模块用于控制每个 Run 的事例循环流程，提供 Geant4 和外部事例产生子之间的接口，负责事例的产生，将每个事例中产生的初级粒子送到 Tracking 模块进行径迹跟踪。

◆ Tracking 和 Track

这两个模块用于对初级粒子以及在探测器中产生的次级粒子的跟踪，跟踪过程一步一步的进行，在每一步中，计算粒子与探测器物质的相互作用，并考虑对步长的限制。粒子与物质发生各种相互作用逐渐损失其能量，直到能量为零或超出探测器几何边界为止。

◆ Geometry

这个模块用于构造探测器的几何结构，为用户提供了构造多种几何结构的类，可定义各种标准几何形状（例如长方体、圆柱体、锥体等）和不规则几何形状（例如扭转双曲面、不规则多面体等），几何单元的尺寸，位置以及转动取向可根据需要任意改变。对于复杂几何单元的构造，可以通过对多个简单几何单元进行逻辑相加、相交或相减来实现。

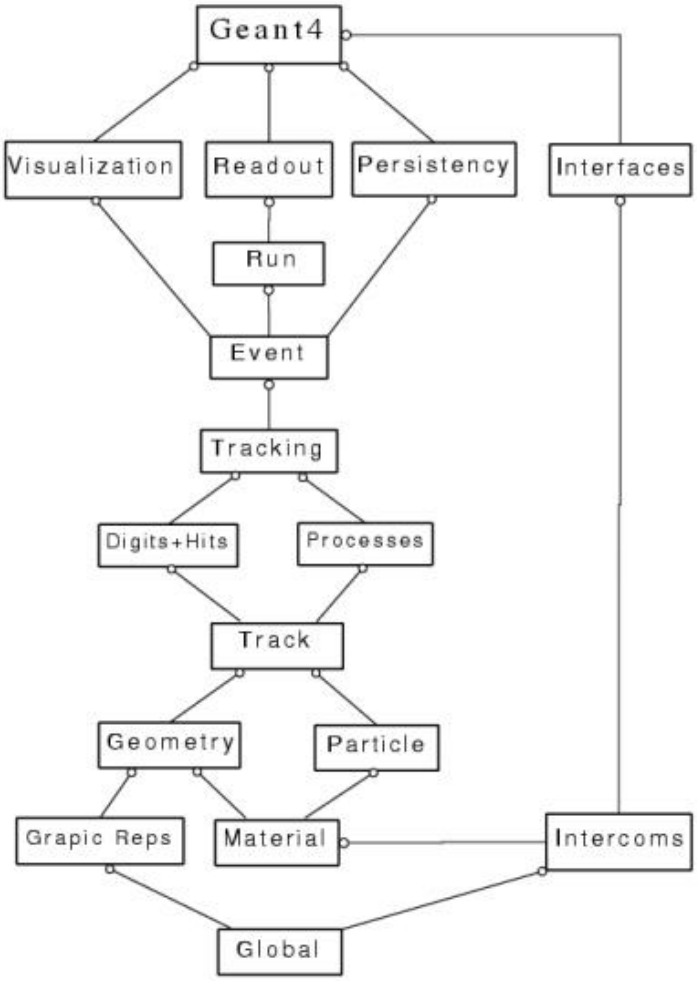

图 8. 1 Geant4 软件包结构图，方框表示各个模块，圆圈方向的模块调用直线另一方的模块

◆ Particle 和 Material

这两个模块用于定义各种粒子和物质材料，包括粒子的质量、电荷、寿命、PDGcode 等物理属性，以及物质材料的密度、组成元素、相互作用截面等参数。用户可以按实际需要来自行定义粒子和物质材料。

◆ Processes

这个模块用于定义粒子与物质发生的各种物理相互作用，包括衰变、电磁相互作用（低能电磁作用和标准电磁作用）、强相互作用、光学光子的作用、和用于快速模拟的参数化物理作用。

◆ Hits 和 Digits

这两个模块用于管理粒子经过灵敏探测器时用户记录的击中信息，以及利用击中信息经过数字化过程计算得到的数字化信息。每个灵敏探测器对应于一种逻辑几何单元，而数字化模块不与任何几何单元发生联系。Geant4 默认情况下不调

用用户定义的数字化模块，需要用户自己来调用。用户负责 hit 和 digit 对象的创建，Geant4 负责对象的删除。

- Visualization

  这个模块用于对几何结构、径迹、击中点的图形显示，提供了多种图形驱动。

- Interfaces

  这个模块管理图形用户界面（GUI）的产生，与外部软件相互作用接口。

8.1.2 G4dyb

G4dyb 是利用 Geant4 编写的大亚湾探测器模拟软件，由大亚湾合作组成员开发完成。

在 G4dyb 的几何模型中定义了大亚湾各个探测器（反中微子探测器、水契伦柯夫探测器、RPC 探测器、PMT 等）的几何参数。同时也定义了各种材料的物理性质，特别是光学参数如探测器内部各种介质的折射率和光衰减长度，液闪的光产额，反射板和 Tyvek 的反射率以及 PMT 的量子效率等。

G4dyb 对物理过程的定义主要涉及以下几个方面：

- 一般过程：主要指粒子和离子的衰变过程
- 参数化过程：PMT 的光学模型，即可见光在 PMT 里面的行为
- 电磁过程：正负电子、光子、μ 子和其他带电粒子的电磁相互作用
- 光核作用：高能宇宙线与原子核的相互作用
- 离子相互作用：主要是氘核、氚核、α 粒子、^{3}He 和其他离子发生的相互作用
- 强子相互作用：重子和介子的相互作用
- 可见光相互作用：包括契伦柯夫过程、闪烁光过程、光子吸收、瑞利散射等

其中有些物理过程直接调用了 Geant4 中的类，有些则是根据大亚湾的特殊要求作了修改。

8.2 μ 子产生子

产生子是指提供给模拟程序进行模拟的初始粒子信息或者提供这些信息的程序。这些粒子是模拟程序需要模拟的粒子，主要信息应该包括粒子种类、粒子能量、动量或入射方向、入射时间、初始位置坐标以及极化方向等。G4dyb 用到的产生子主要有 μ 子产生子，中子产生子，反 β 衰变产生子，放射性本底产生子等。RPC 整体效率的模拟，正是使用了 μ 子产生子。

μ 子产生子程序依赖于大亚湾各个实验点 μ 子的流强、能谱和角度分布等信息，这部分的模拟可以参考文献[57]。这里作一下简单的介绍。假设在大亚湾实验每个实验点的山体表面上，μ 子的流强分布与海平面一致，即 Gaisser 公式[58]：

$$\frac{dI}{dE_\mu d\cos\theta} = 0.14\left(\frac{E_\mu}{GeV}\right)^{-2.7}\left[\frac{1}{1+\frac{1.1E_\mu\cos\theta}{115GeV}}+\frac{0.054}{1+\frac{1.1E_\mu\cos\theta}{850GeV}}\right] \quad (1)$$

大亚湾对此公式进行一些必要的修正，使之与实验数据能够更好地符合。然后对大亚湾山体的实际地形进行数字化，如图 8.2 所示。在此基础上，使用 MUSIC[59]模拟程序模拟 μ 子穿过岩石的过程，最后得到各个实验点的 μ 子流强分布。图 8.3 显示了 μ 子在三个实验点的流强信息。

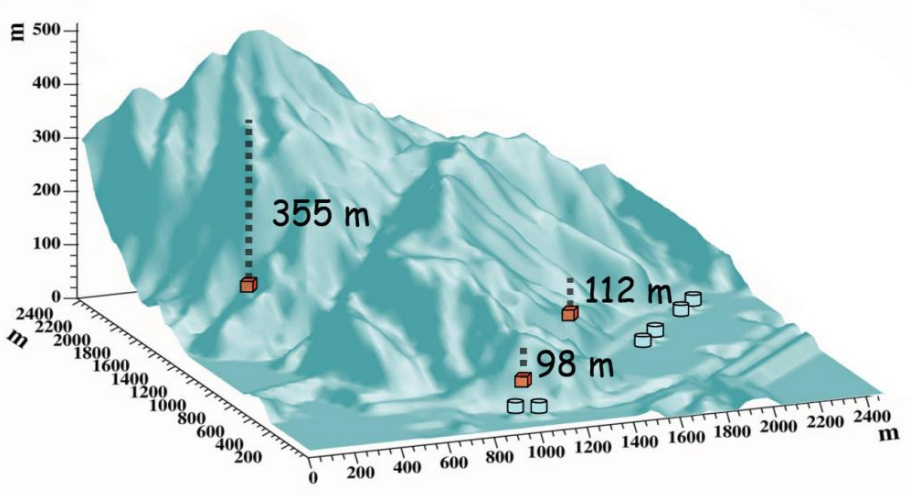

图 8.2 三维数字化山形图。图中三个红点就是三个实验厅所在位置

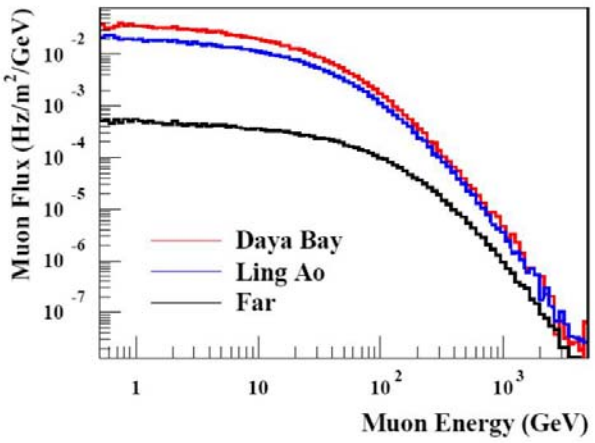

图 8.3 三个实验点的 μ 子流强的模拟结果

μ 子产生子就是根据 μ 子在三个实验厅的流强数据和探测器的几何形状信息给出 μ 子进入探测器的初始状态信息的。文献[60]给出了 μ 子的抽样方法以及大亚湾远点方向矢量 X 和 Y 的分量分布，如图 8.4 所示。从图中可以看出 X 和 Y 分量并不对称，这跟山体的作用有关。这种不对称性还跟探测器具体摆放角度有关。

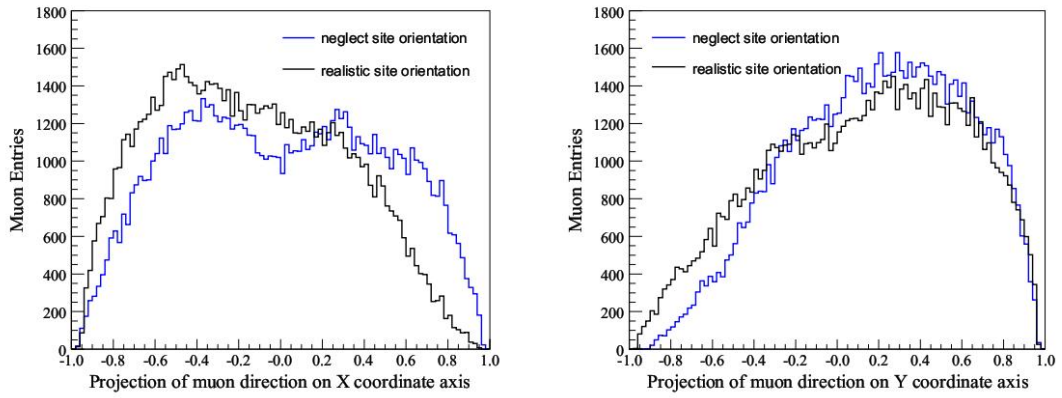

图 8.4 μ 子击中探测器方向矢量的 X 和 Y 分量分布。黑线忽略了探测器转角的分布，蓝线是真实转角情况下的分布

8.3 位置与几何

在 G4dyb 中构建的 RPC 几何（包括模块的摆放和内部结构），与真实情况基本接近，在一些比较复杂又对整体影响不大的地方作了简化*。图 8.5 是大亚湾远点实验厅的 9 × 9 RPC 模块阵列的摆放效果示意图[61]。为了减少模块周边死区的影响，摆放时各个模块的边缘是重叠的。 图 8.6 表示了从 A、B 两个视角观看模块阵列时的重叠情况。从 View A 中可以看到，各个模块不是水平放置的，而是有一个倾斜角以便于和其他模块产生重叠。View B 中可以看到，各个模块在另一方向上也有重叠。

在构建的几何中，每个模块的尺寸设为 2190 × 2150 × 75 mm，倾斜角设为 2.7195°。模块重叠区宽度为 100 mm，上下模块的缝隙为 20 mm。模块内部均匀放置 4 层 2100 × 2100 mm 的 RPC 探测器（对实际情况作了简化处理），探测器周围 10 mm 设置为探测死区。每层的探测灵敏区被 8 道读出条平分，4 层的读出条方向依次为 X-Y-Y-X 形式交叉排布。

* RPC 几何构建的工作由徐吉磊完成

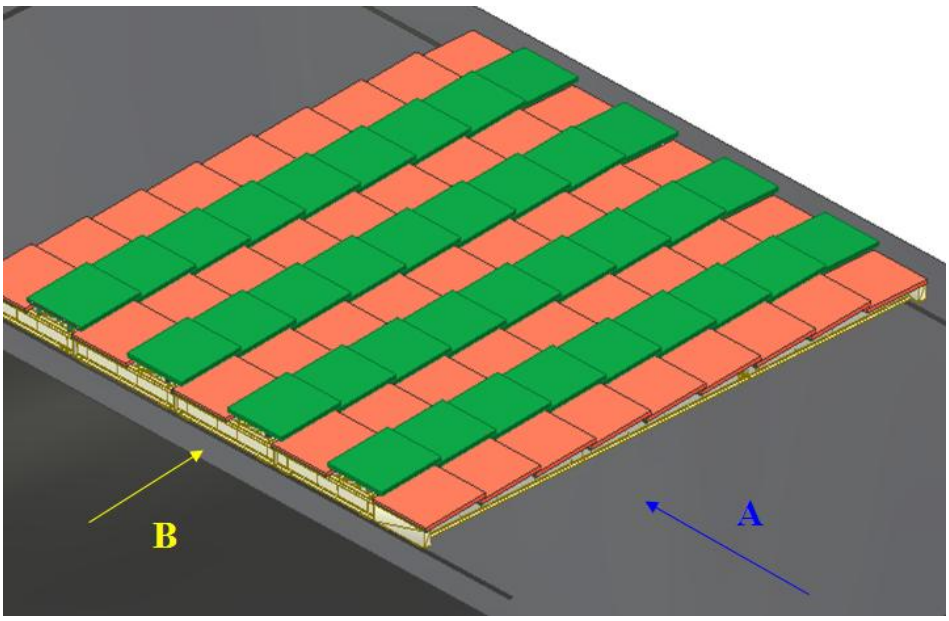

图 8. 5 大亚湾远点的 RPC 模块阵列

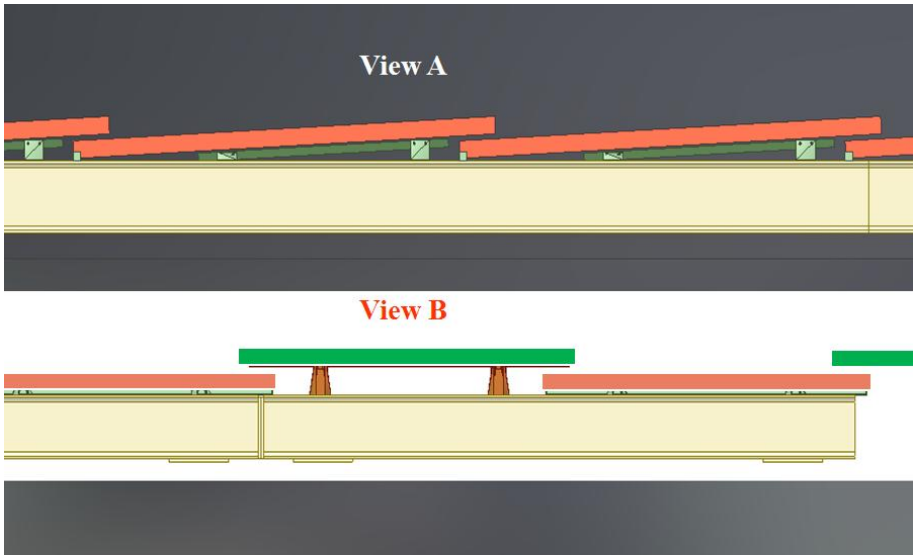

图 8. 6 模块摆放方式示意

8.4 系统效率模拟

以大亚湾远点的 9 × 9 个 RPC 模块阵列为例，在其外部 20 ×20 × 0.5 m 的立方体外表面用 μ 子产生子播撒 400 万个 μ 子事例，其中实际到达 RPC 模块的事例约为 300 万。利用 G4dyb 给出的击中信息，通过筛选事例的方式模拟了各种故障情况下对整个 RPC 系统效率的影响。根据第五章 RPC 宇宙线测试的结果，将来用于大亚湾的 RPC 平均效率约为 96%，而且分布都集中，所以在模拟过程中将所有 RPC 的效率都设置成了 96%。

8.4.1 模块故障

模块故障模拟的是整个 RPC 模块（共 8 个 RPC）都不工作时的情况。当一个模块的高压没加上或者其 FEC 损坏时有可能使整个模块都失效。图 8. 7 显示了模块故障模块数量与 RPC 系统效率的模拟结果。其中红色粗线代表 4 选 2 的效率，黑色细线代表 4 选 3 的效率。故障模块的选取是随机的。图中可以看到 4 选 2 效率和 4 选 3 效率的变化趋势基本一致，都与故障模块的数量大致呈线性反比。表 8. 1 列出了故障模块 6 个以内的 4 选 2 和 4 选 3 效率的数值。它们与剩余无故障模块的比例大致接近，但又有细微的差别。这个差别是由 RPC 的效率，模块之间的重叠因素引起的。

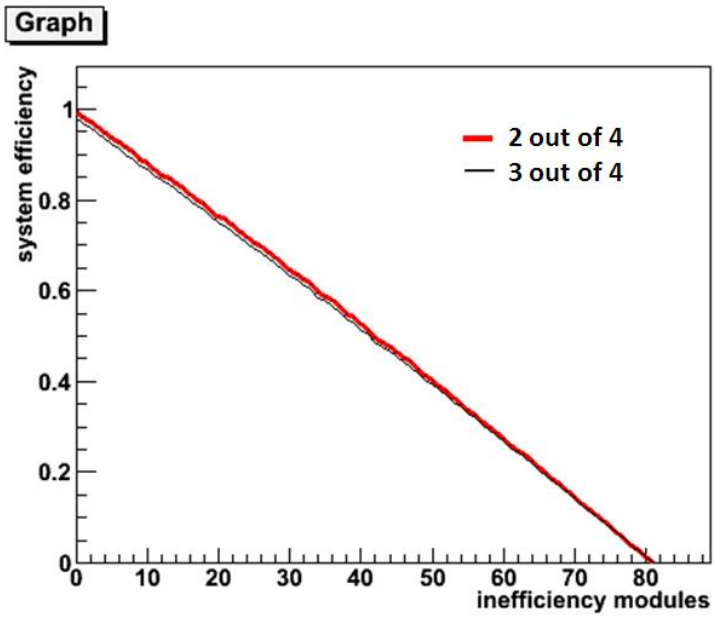

图 8. 7 故障模块数量与系统整体效率

表 8. 1 故障模块数量与系统整体效率

Inefficiency modules	0	1	2	3	4	5	6
Proportion of good modules	100%	98.77%	97.53%	96.30%	95.06%	93.83%	92.59%
System efficiency 2/4	99.47%	98.31%	97.22%	96.07%	94.97%	93.89%	92.82%
System efficiency 3/4	98.05%	96.90%	95.80%	94.66%	93.55%	92.45%	91.37%

在 9 × 9 的模块阵列中，一共有 32 个模块处于外围边沿，49 个模块处于内部。分别对它们进行模拟后，可以发现一些细小的差别，如图 8. 8 所示。图中的红色粗线是外围模块，黑色细线是内部模块。(a) 图是 4 选 2 的效率对比，(b) 图是 4

选 3 的效率对比。可以发现，相等的损坏模块数量，如果发生在外围模块，系统效率下降的幅度要稍大一些。这个细微的差别体现了模块与模块之间重叠部分的作用。外围的模块至少有一个边没有与其他模块交叉，而内部的模块四周都有其他模块层叠，所以坏掉一个外围的模块对 RPC 系统的整体效率影响要稍微大一些。

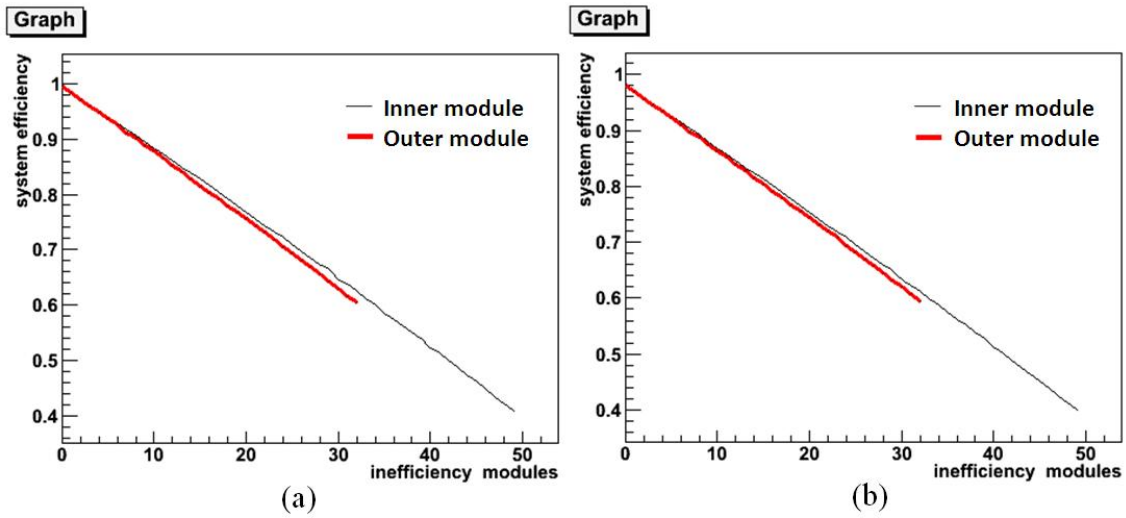

图 8. 8 外围模块与内部模块对系统效率的影响。(a): 4 选 2 效率，(b): 4 选 3 效率。

8.4.2 探测层故障

读出层故障模拟的是模块内部一层探测器没有信号的情况。每个模块有 4 层 RPC，每层的读出条，其 8 路信号通过同一根信号电缆引出，当此电缆出现损坏或者断开连接的时候，就会出现整层没有信号的情况。

图 8. 9 显示了不同探测层故障数量下系统整体效率的模拟结果。红色粗线代表 4 选 2 的效率，黑色细线代表 4 选 3 的效率。模拟中设定故障层数后，故障探测层的选取是随机的。其中(a) 图对故障层数从 0 到 64 层，每增加一层都进行了模拟；(b) 图模拟的范围更宽，从无故障到坏掉所有 324 层，每次间隔 8 层以缩短运算时间。

从图中可以看到，随着故障读出层的增多，两个效率都呈下降的趋势，而 4 选 3 的效率比 4 选 2 的效率下降得更多，这是因为 4 选 3 对探测层数的依赖更大。在(a)中，当故障探测层在 10 层以内时，两个效率下降都很平稳；故障层继续增加，4 选 3 的效率就开始振荡着下降，接着 4 选 2 的效率也开始振荡下降。出现这种振荡的原因跟随机抽取的故障探测层分布有关。同样是 n 个故障探测层，如果分布在 n 个模块中（假设 $n \leq 81$），每个模块一层，那么对总体效率的影响是最小的。如果以每个模块 3 层分布，那么这 n/3 个（取整）模块的效率全为零，对整个 RPC

系统的效率影响就最大。图 8. 10 模拟了这两种极端条件，红色粗线代表故障层分布于不同模块的情况，系统效率达到最高；黑色细线是故障层每三个分布于同一模块的情况，系统的效率达到下限。图 8. 9 中的振荡范围就在这两条线之间。所以，系统整体效率跟随机抽取的 n 层故障探测层的分布有关系，这种不确定性使得两条效率曲线不是平稳下降，而是表现出振荡的形态。而当 n 比较小时，它们分布于不同模块的概率就很大，所以此时两条效率曲线是平稳下降的。表 8. 2 给出了故障探测层 n < 12 时两种效率的模拟数值。

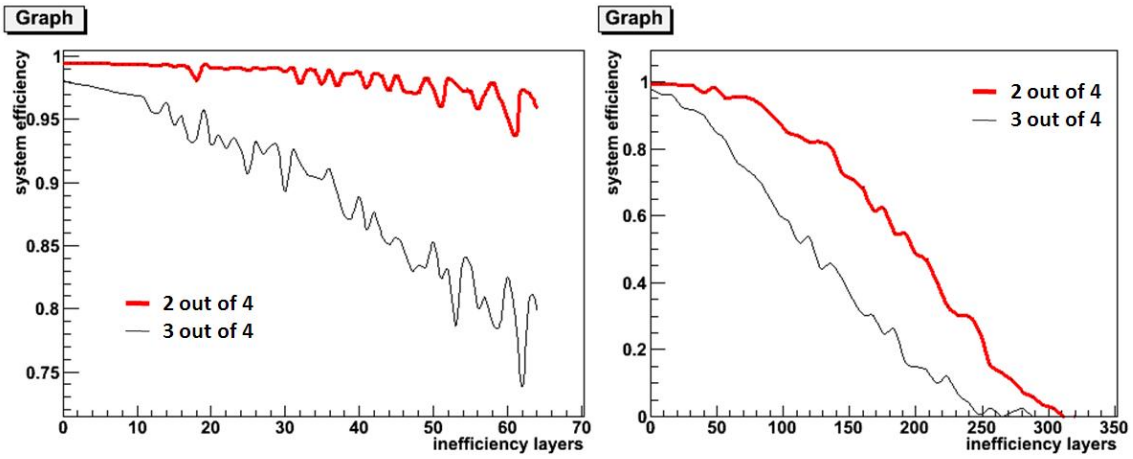

图 8. 9 探测层故障数量与系统整体效率

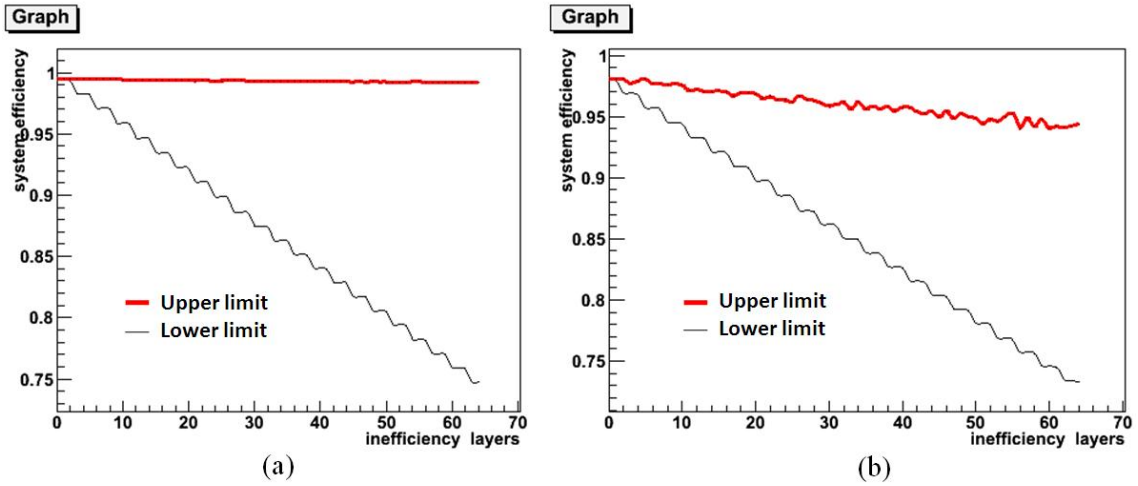

图 8. 10 不同故障层数时系统整体效率的上限与下限。(a): 4 选 2 效率; (b): 4 选 3 效率

表 8. 2 故障探测层数量与系统整体效率

Inefficiency layers	0	1	2	3	4	5
System efficiency 2/4	99.47%	99.46%	99.45%	99.44%	99.44%	99.43%
System efficiency 3/4	98.05%	97.93%	97.81%	97.70%	97.58%	97.45%
Inefficiency layers	6	7	8	9	10	11
System efficiency 2/4	99.43%	99.40%	99.40%	99.38%	99.38%	99.37%
System efficiency 3/4	97.33%	97.12%	97.08%	96.94%	96.84%	96.69%

8.4.3 RPC 裸室故障

RPC 裸室故障是指以整个 RPC 探测器为单位发生的故障。当某个 RPC 的高压接头脱落或者高压 trip 时，就会引起这类故障。

图 8. 11 展示了故障 RPC 数量与系统整体效率的模拟结果。图中红色粗线代表 4 选 2 的效率，黑色细线代表 4 选 3 的效率。其中(a)图的模拟每次增加一个故障 RPC，以查看细节；(b)图模拟的范围更宽，因而每次模拟增加 10 个故障 RPC，以缩短运算时间。设定好数量后，故障 RPC 的选取是随机的。从图中可以看到，两条效率曲线的变化规律跟图 8. 9 非常相似，也是随着故障数量的增多而振荡下降。通过上一节的分析，对这种现象就不应感到奇怪了。表 8. 3 给出了故障 RPC 数量为 0 到 11 之间时系统效率的模拟数值。

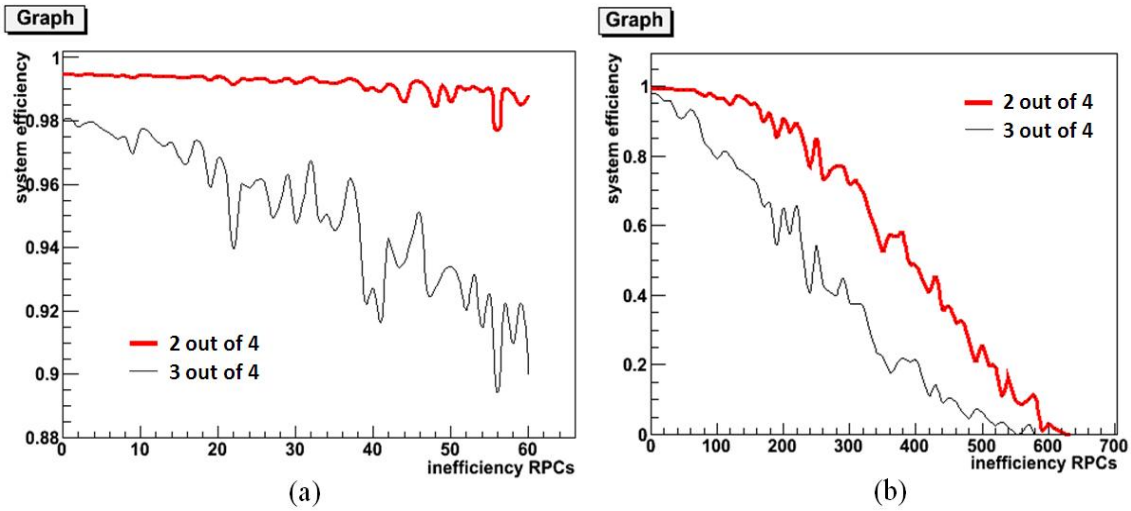

图 8. 11 故障 RPC 数量与系统整体效率

表 8. 3 故障 RPC 数量与系统整体效率

Inefficiency layers	0	1	2	3	4	5
System efficiency 2/4	99.47%	99.47%	99.45%	99.46%	99.46%	99.45%
System efficiency 3/4	98.05%	98.06%	97.81%	97.94%	97.94%	97.75%
Inefficiency layers	6	7	8	9	10	11
System efficiency 2/4	99.44%	99.42%	99.42%	99.37%	99.45%	99.44%
System efficiency 3/4	97.62%	97.42%	97.49%	96.97%	97.69%	97.69%

8.4.4 读出道故障

RPC 模块中每层有 8 个信号读出道，总共有 32 道。远点 81 个模块共计有 2592 个读出道。读出道信号引出的部位发生断接时，就会使单个读出道没有信号。

图 8. 12 显示了故障读出道数量与系统效率的模拟结果。(a)图模拟的步长是 2 道，(b)图模拟步长是 8 道。设定模拟数量后，故障读出道的选取也是随机的。与图 8. 11 和图 8. 9 中的结果比较，这里的两条效率曲线的振荡幅度明显小了很多。这是因为一个模块里面包含的读出道数量相对较大（32 道），随机抽取的故障读出道恰好集中分布于同一模块同一信号层的概率就变得非常低，远远低于分散于各个模块各个信号层的概率。列出了一些故障信号道数时的 4 选 2, 4 选 3 效率模拟值。

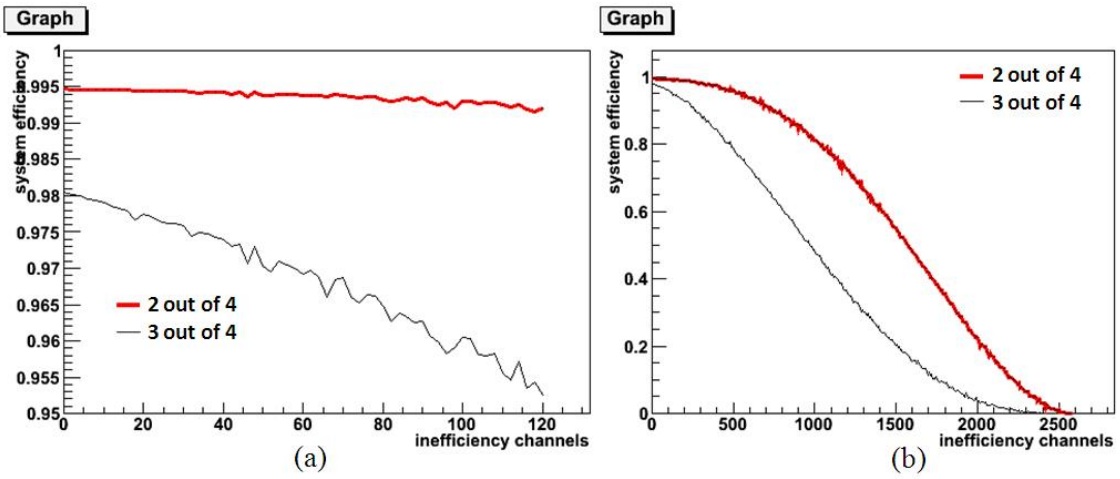

图 8. 12 故障信号读出道与系统整体效率

表 8. 4 故障信号读出道与系统整体效率

Inefficiency channels	0	2	4	6	8	10
System efficiency 2/4	99.47%	99.47%	99.46%	99.46%	99.46%	99.46%
System efficiency 3/4	98.05%	98.02%	98.00%	97.95%	97.93%	97.90%
Inefficiency channels	12	14	16	18	20	22
System efficiency 2/4	99.46%	99.46%	99.45%	99.44%	99.45%	99.44%
System efficiency 3/4	97.85%	97.83%	97.79%	97.66%	97.74%	97.71%
Inefficiency channels	24	26	28	30	32	34
System efficiency 2/4	99.44%	99.44%	99.44%	99.44%	99.43%	99.42%
System efficiency 3/4	97.66%	97.62%	97.62%	97.58%	97.45%	97.50%
Inefficiency channels	36	38	40	42	44	46
System efficiency 2/4	99.43%	99.42%	99.43%	99.39%	99.42%	99.37%
System efficiency 3/4	97.47%	97.42%	97.40%	97.30%	97.34%	97.06%

8.4.5 RPC 效率偏移

除了各种故障导致系统效率降低之外，RPC 自身效率的波动也会导致系统效率的改变。导致这种波动的原因除了 RPC 自身的原因之外，还有工作气体以及环境的影响。例如在气压波动较大的季节，如果气压降低 3%，假设实验大厅的温度保持恒定，那么根据第五章（5.2）式，RPC 的工作高压也需要升高 3%才能保持 RPC 性能不变。如果没有调整高压，那么 RPC 的平均效率将会降低。根据 RPC 宇宙线测试的结果，如果保持其他条件不变，RPC 的加载高压从工作高压 8000 V 下降至 7800 V 后，平均效率将下降 0.7 %左右。

图 8. 13 模拟了系统效率随 RPC 裸室平均效率的变化趋势。4 选 3 的效率对 RPC 平均效率的依赖比较大。当 RPC 平均效率从 96 %下降到 95 %时，系统 4 选 3 的效率从 98.06 %下降到 97.61 %，下降了 0.45 %。系统 4 选 2 的效率则下降很少，约 0.03%。

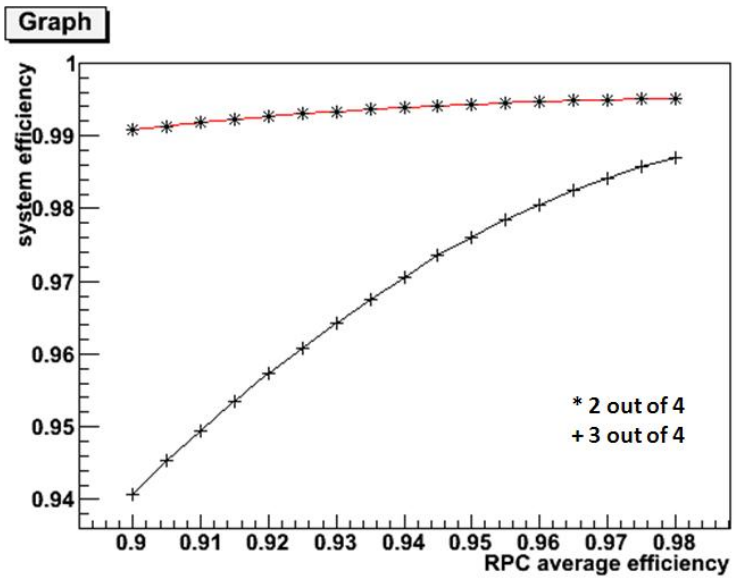

图 8. 13 RPC 平均效率与系统整体效率

8.5 RPC 效率与中子探测

反符合系统在大亚湾实验中的作用是对引起快中子的 μ 子的探测，并将其产生的中子本底予以扣除。大亚湾实验设计了水契伦柯夫和 RPC 两套反符合探测器，以尽可能多地排除本底。水契伦柯夫探测器利用 PMT 收集 μ 子穿过水池时发出的契伦柯夫光来达到粒子探测的目的。其探测效率与 μ 子在水池的径迹长度密切相关，根据模拟的结果[62]，μ 子在水中的径迹长度超过 50 cm 时，μ 子将产生足够大的契伦柯夫光被水契伦柯夫探测器探测到，探测效率将达到 100%，如图 8. 14 所示。（当然，如果水池中水的吸收长度达不到设计要求时，效率将会降低。[63]）因此位于水池上方的 RPC 系统除了能够对水契伦柯夫探测器的效率进行检验之外，其重要意义还在于对短径迹长度 μ 子，以及穿过岩石的 μ 子产生的中子本底的探测。后者是水契伦柯夫探测器无法探测到的。本节将分析 RPC 效率下降后，对这两种中子探测效率的影响。

还是以远点为例，在实验大厅外部 2 米厚度的岩石上根据 μ 子产生子样本放置 1000 万个 μ 子，确定顶点和入射方向。假设 μ 子沿直线传播，产生的中子位于其传播路径上。根据几何计算，得到 μ 子在岩石或者水中的径迹长度。Geant4 根据 μ 子的能量和穿越物质的密度能得到产生的中子和次级中子的平均数量。这部分的具体模拟工作见参考文献[62]。

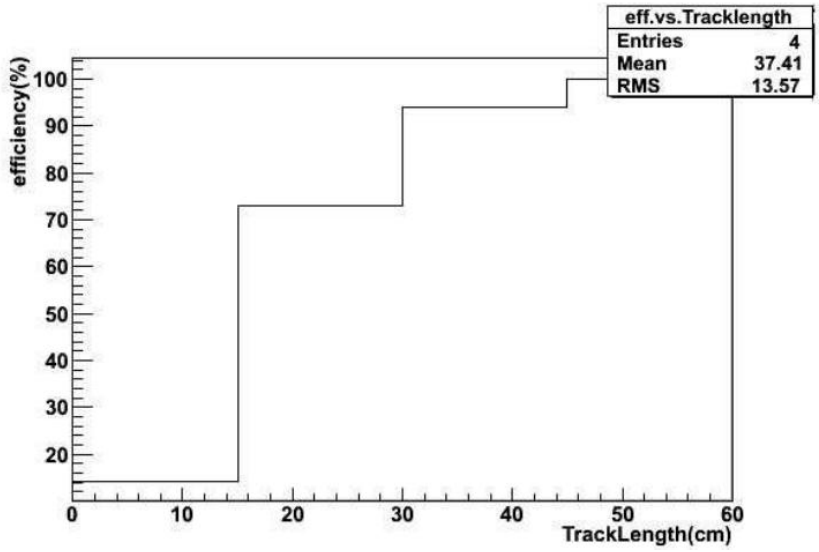

图 8. 14 μ 子探测效率与径迹长度的关系[62]

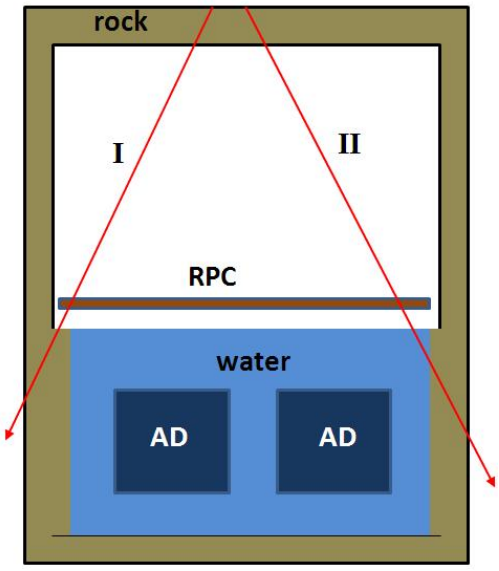

图 8. 15 μ 子入射位置示意图

我们分析的对象主要是两类 μ 子产生的中子，如图 8. 15 所示。I 类 μ 子穿过 RPC 系统但是不穿过水池，因此水契伦柯夫探测器不可能产生响应，效率为 0。这类 μ 子只能依靠 RPC 进行探测。II 类 μ 子穿过 RPC 系统也穿过水池，但是在水中的径迹较短，我们设定为 ＜2m。水契伦柯夫探测器有可能探测不到这类 μ 子，所以也依赖于 RPC 对它的探测。

8.5.1 I 类中子

图 8. 16 显示了每个产生 I 类中子的 μ 子打出的中子数的分布。绝大部分 μ 子

的中子产生数在 5 个以内，但也有少数能量极大的 μ 子产生 shower 能打出多达几百上千个中子，图中给出的平均值为每个 μ 子产生 3.6 个中子。根据模拟结果，总的 I 类中子产生数约为 45 万，如果 RPC 系统的效率为 100%，那么可以完全排除这些中子的影响。当 RPC 系统效率下降时，对这类中子的探测效率下降情况如图 8. 17 所示。下降的趋势基本呈线性，表 8. 5 给出了 RPC 系统效率 90 到 99%时的模拟结果，其中的误差是根据 μ 子数量的随机统计误差计算所得。

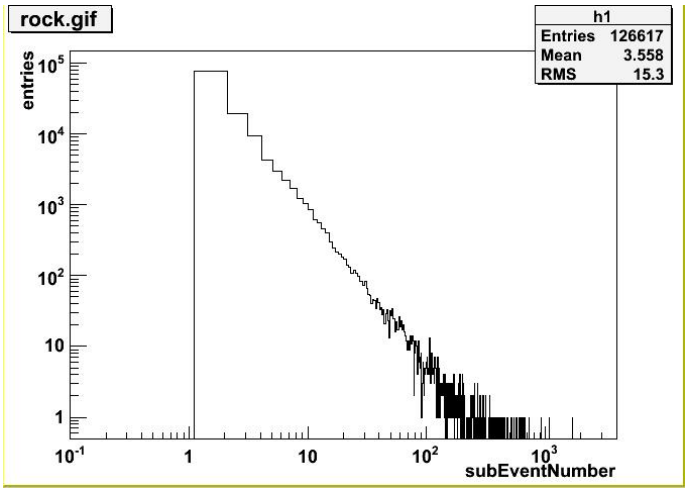

图 8. 16 不穿过水池的 μ 子打出的中子数分布

表 8. 5 不同 RPC 系统效率下，对 I 类中子的探测效率

RPC 效率	90%	91%	92%	93%	94%
中子探测比例	89.59%	90.79%	92.47%	93.18%	93.64%
误差	0.30%	0.30%	0.29%	0.29%	0.29%
RPC 效率	95%	96%	97%	98%	99%
中子探测比例	95.13%	95.87%	96.93%	97.99%	99.00%
误差	0.29%	0.29%	0.29%	0.28%	0.28%

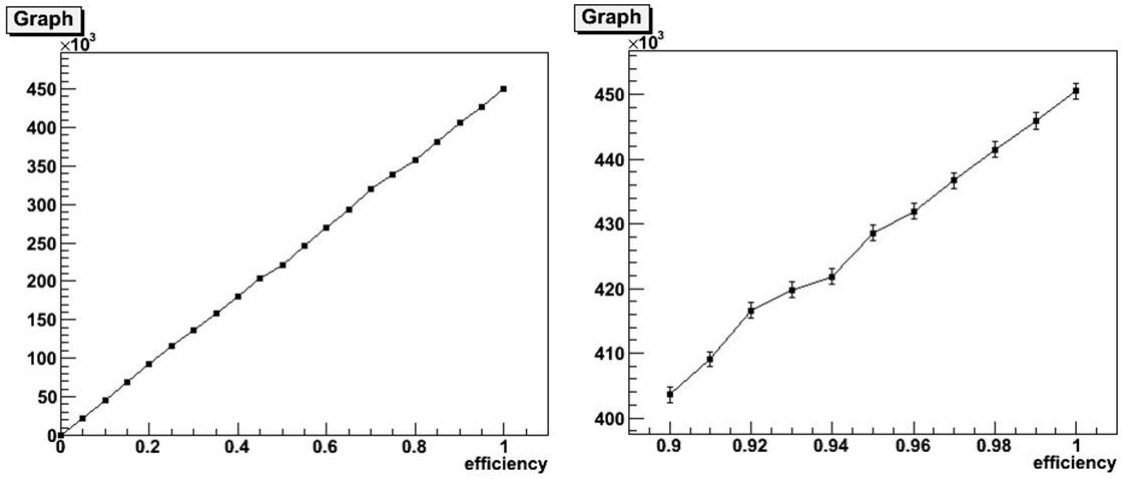

图 8. 17 I 类中子探测数量与 RPC 系统效率

8.5.2 **II 类中子**

图 8. 18 是产生 II 类中子的 μ 子每个产生中子数的分布。与图 8. 16 基本相似，但是平均值和 RMS 都要大一点，模拟中产生此类中子的数量约为 12 万，平均每个 μ 子产生 4.0 个中子。 产生 II 类中子的 μ 子在水中的径迹长度< 2 m, 我们再将它细分为 0 – 50 cm，50 – 100 cm 和 100 – 200 cm 三种。三种 II 类中子的探测数量与 RPC 系统效率的模拟结果分别如图 8. 19，图 8. 20，图 8. 21 所示。三个图中，中子的探测数量和 RPC 系统效率都大致呈线性关系，但是涨落比较大。这个涨落跟个别 μ 子发生 shower 产生大量中子有关。这些 μ 子是否被 RPC 探测到就对结果的影响非常大。与 I 类中子比较，这里的总事例数较少，因此带来的统计误差也比较大。这两个因素导致了探测中子数与 RPC 效率关系曲线的涨落。图中的误差是根据 μ 子数量的随机统计误差计算所得。

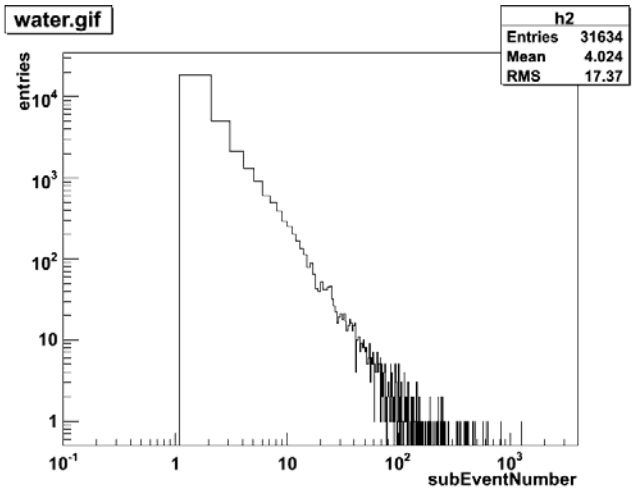

图 8. 18 水中径迹<2m 的 μ 子产生中子数量的分布

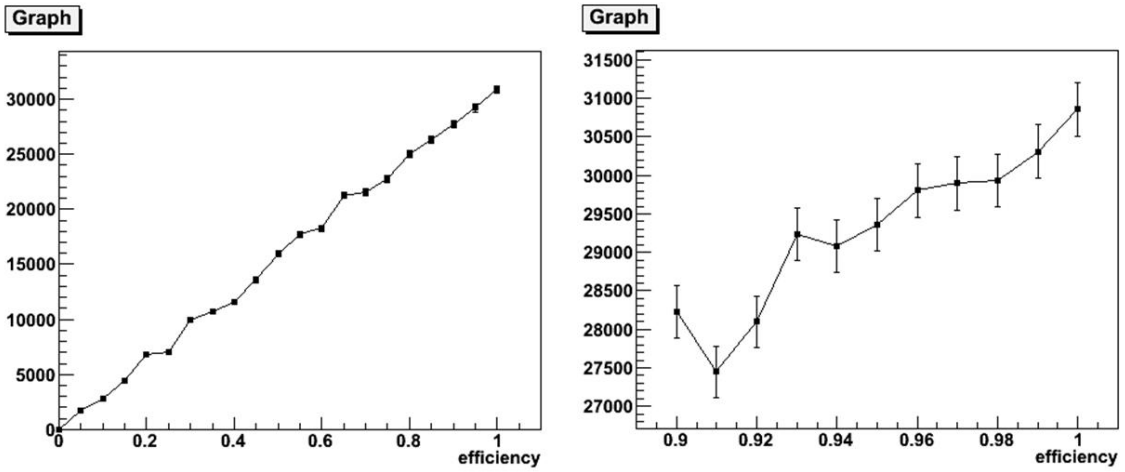

图 8. 19 II 类中子探测数量与 RPC 系统效率（径迹<50cm）

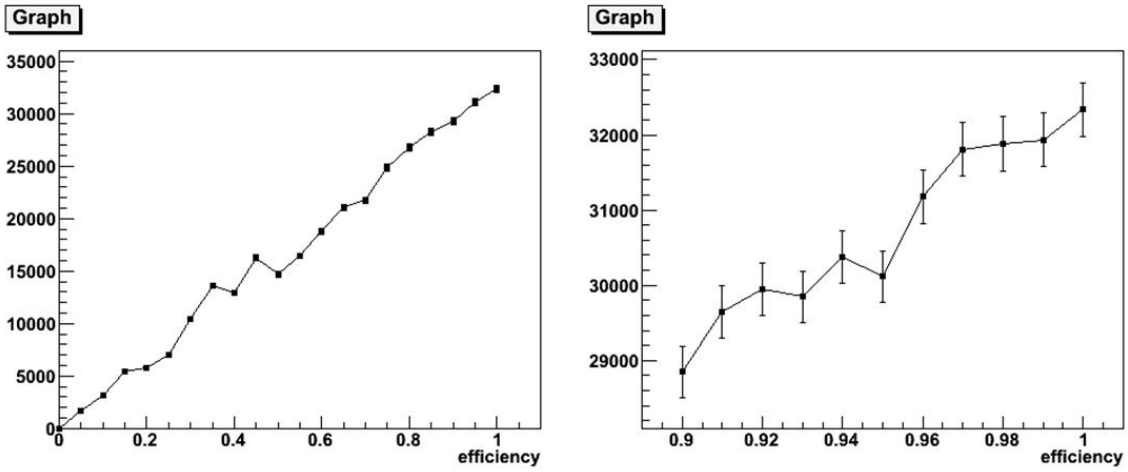

图 8. 20 II 类中子探测数量与 RPC 系统效率（径迹 50-100cm）

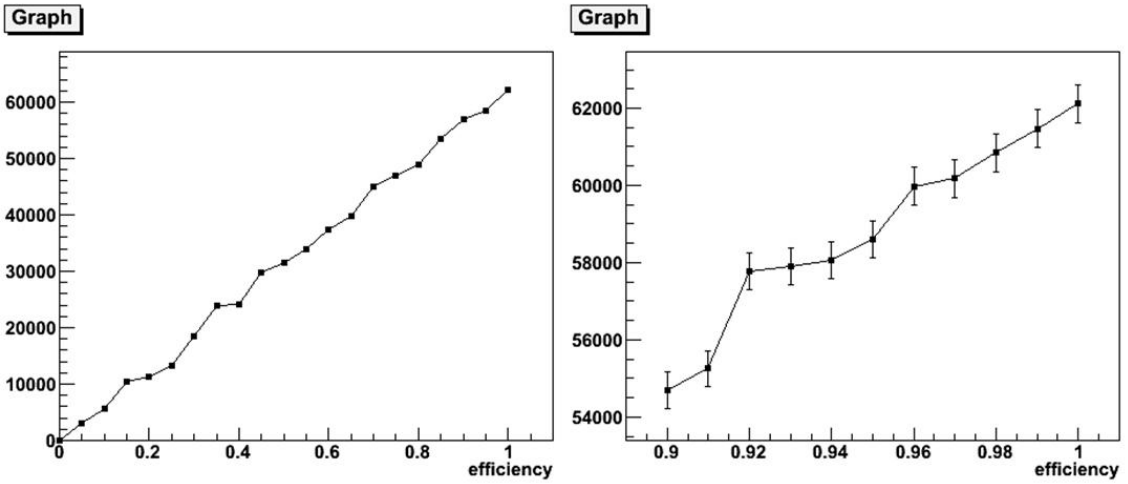

图 8. 21 II 类中子探测数量与 RPC 系统效率（径迹 100-200cm）

8.6 RPC 效率与本底

从上节的结果看，RPC 系统效率降低后，对短径迹和零径迹 μ 子产生的中子的探测效率都将显著降低。至于这些中子最终能不能进入到中心探测器，对本底会产生多大的影响，依靠上节的模拟量很难得到有意义的结果，因为对本底的模拟需要更加庞大的事例数来支撑。因此本节通过模拟大亚湾近点实验厅约 1.8 亿个 μ 子，分析 RPC 效率降低时，进入中心探测器的中子（AD 中子）的探测效率将会如何变化。

大亚湾近厅放置有两个中心探测器，放置于 $16 \times 10 \times 10\ m^3$ 的水池中。模拟结果显示，最终进入到中心探测器液闪的中子约有 4 万个，这些中子如果不予以扣除则有可能会形成本底。图 8. 22 显示的是中子被俘获的情况，横坐标代表的是俘获核的原子序数。大约有 3 万个中子被 H 原子俘获，约 1 万个中子被 Gd 原子俘获。图 8. 23 显示了它们俘获位置的 X,Y,Z 坐标分布。

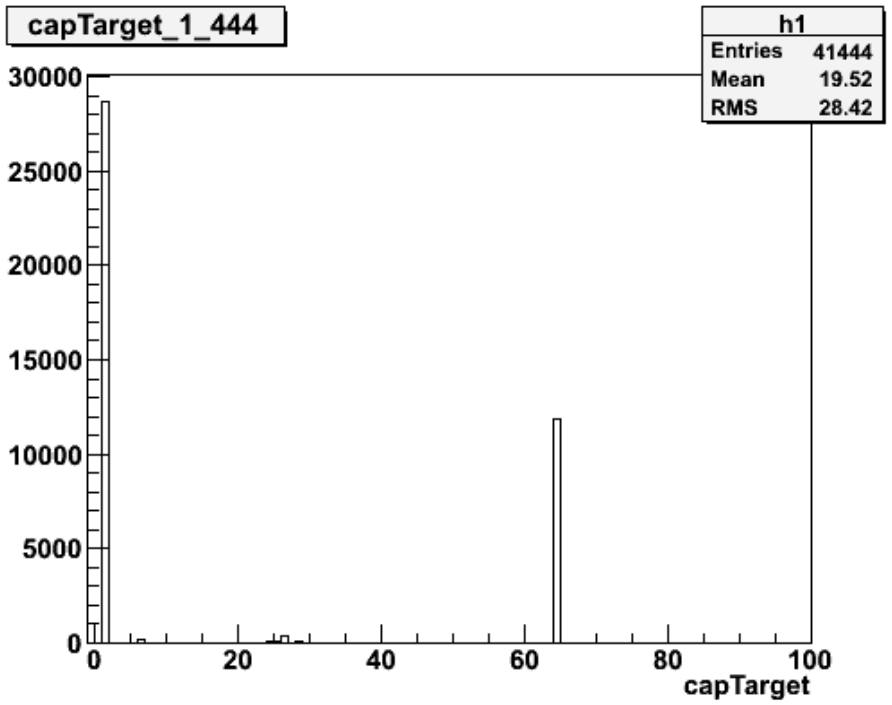

图 8. 22 中心探测器液闪俘获中子的情况

水契伦柯夫探测器对 μ 子的探测效率与 μ 子在水中的径迹长度密切相关。图 8. 24 显示了这些中子对应的 μ 子在水中的径迹长度分布。其中径迹长度为 0 的是穿过岩石，不穿过水池的 μ 子。我们假设对于不同径迹长度的 μ 子，水契伦柯夫探测器的平均效率如表 8. 6 所示，那么我们只需要考虑 RPC 对径迹长度小于 2 m

的 μ 子的探测情况。

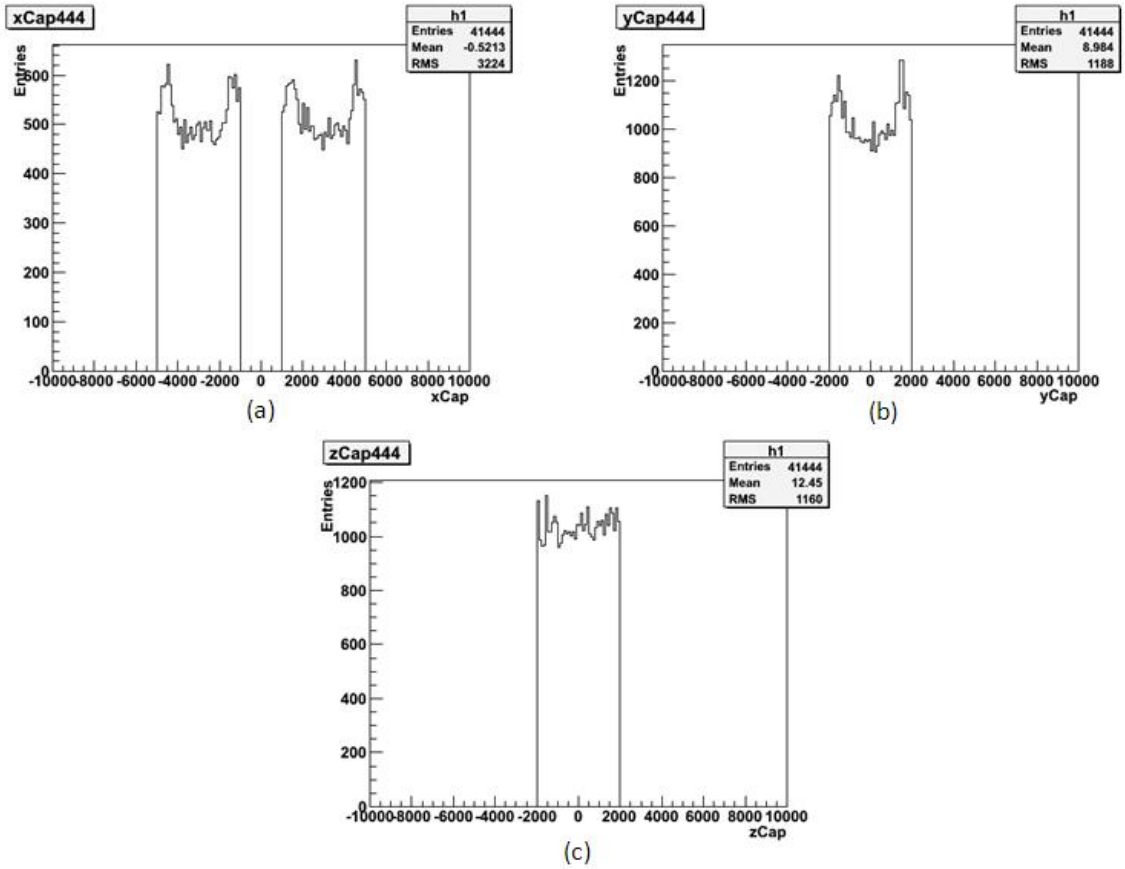

图 8. 23 中子俘获位置的 X (a),Y (b),Z (c) 坐标分布(mm)

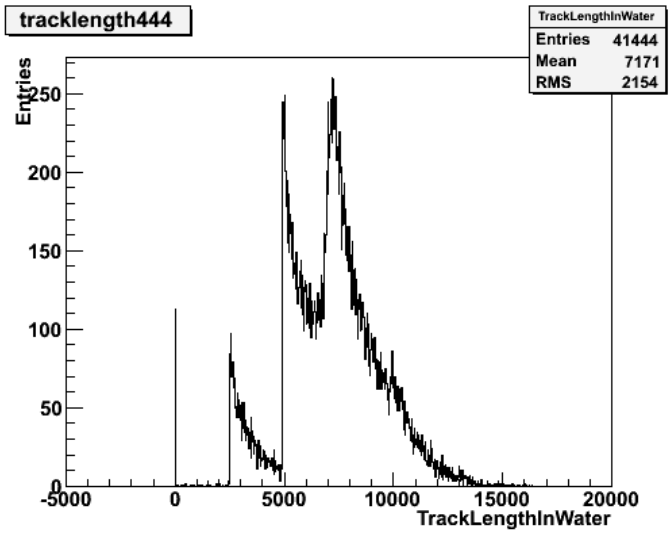

图 8. 24 产生 AD 中子的 μ 子在水中的径迹长度(mm)

表 8. 6 水契伦柯夫探测器探测效率与 μ 子径迹长度的假设

径迹长度(mm)	<0.1	0.1 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	>2000
探测效率	0	50%	90%	95%	100%

根据模拟的结果，来自于径迹长度< 0.1 mm μ 子产生的中子（岩石中子）数量为 113 个，来自径迹长度 0.1 – 2000 mm μ 子产生的中子（水中子）数量为 27 个。如果 RPC 的效率为 100%，对前者可以探测到 38 个，约占 1/3，对后者可以探测到 17 个，约占 60%。图 8. 25 模拟了 RPC 系统效率与探测失败的中子数之间的关系。所谓探测失败的中子是指既没有被水契伦柯夫探测器扣除，也没有被 RPC 探测器扣除的中子。由于总事例数不足，我们无法模拟 RPC 效率与本底之间的关系，但是这些中子的数量与本底的数量是密切相关的。

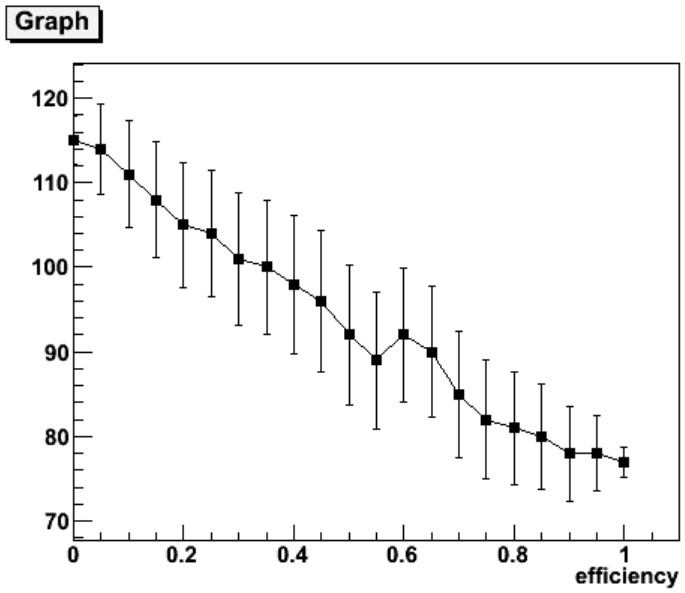

图 8. 25 RPC 系统效率与未探测到的 AD 中子数量的关系

8.7 本章小结

本章以远点的 RPC 系统为例，通过模拟的方式分析了将来 RPC 系统出现各种故障时，对系统整体效率的影响。对不同数量的模块、信号层、RPC 以及信号道不工作的情况都做了模拟。另外还模拟了 RPC 平均效率偏移后，系统效率的变化情况。最后分析了 RPC 系统效率下降对本底带来的影响。

第九章 总结与展望

本论文的工作主要围绕大亚湾实验中的 RPC 探测器展开，依次介绍了大亚湾 RPC 的前期研究，批量生产以及期间的质量控制，宇宙线测试及其结果的分析，RPC 工作气体的研究、质量控制数据库的建设以及大亚湾 RPC 系统效率的模拟。

在 RPC 前期研究部分，主要介绍了 RPC 读出条性能的研究、气体的预研以及 RPC 模块的设计。通过实验验证了长读出条通过良好的电阻匹配后能够用于 RPC 信号的读出。

第二部分介绍了 RPC 的生产工艺以及各个质量控制的关键环节。在高能科迪公司以及高能所同仁的共同努力下，我们顺利地完成了大亚湾 RPC 的批量生产。

第三部分介绍了 RPC 的宇宙线测试。宇宙线测试是 RPC 质量认证的最主要环节。测试的结果表明，RPC 的平均效率达到了 95%以上。扣除不合格的 RPC 后，应用于大亚湾的 RPC 平均效率预计可达 96%。

第四部分 RPC 工作气体的研究。目的是为了更好地发挥 RPC 的性能。通过实验定量给出了气体与性能的关系。结果还表明在工作气体中加入少量的 SF_6 能够在保证 RPC 效率的同时降低噪声和暗电流，同时也能得到较大的工作高压范围。

第五部分是 RPC 质量控制数据库的建设。为保存和有效地管理 RPC 批量生产和宇宙线测试中的数据而设计的 RPC 质量控制数据库，可以用来及时了解生产和测试情况，同时也为数据的分析提供了极大地方便。

最后针对将来 RPC 可能出现的故障，模拟了各种故障条件下，对 RPC 系统整体效率的影响。

大亚湾是继 BESIII 之后，高能所对 RPC 的又一次大规模应用。相比 BESIII，由于我们有了更丰富的实践经验，进行了更加仔细的质量控制，因此得到了一批质量更高性能更好的 RPC，可以预期在大亚湾实验中发挥其应有的作用。本论文对宇宙线测试结果的总结和分析和对 RPC 工作气体、工作高压以及两者之间关系的研究可以为将来的运行提供重要的参考。本论文的不足之处是对 RPC 性能的研究还停留在实验上，总结的规律也都是基于实验而对 RPC 工作机理的研究还不够深入。这需要充分了解 RPC 内部发生的物理过程，并对其进行模拟。尽管 RPC 是一种结构简单的探测器，但要真正理解它，还有很长的路要走。

参 考 文 献

[1] LHC Study Group. The Large Hadron Collider: Conceptual Design Report.CERN/AC/95－05 LHC(1995)

[2] BaBar Collaboration, Nucl. Instr. and Meth. A 479 (2002) 1

[3] BELLE Collaboration, Nucl. Instr. and Meth. A 479 (2002) 117

[4] Super-Kamiokande Collaboration, Nucl. Instr. and Meth. A 501 (2003) 418

[5] Daya Bay Collaboration, arXiv: hep-ex/0701029, 2007

[6] 谢一冈等.粒子探测器与数据获取.北京：科学出版社，（2004），1－3

[7] KamLAND collaboration，Particle and Nuclear Physics. 57 (2006) 106

[8] Boehm F et al.,Phys. Rev. D, 2000, 62: 072002

[9] Fogli G L et al., hep – ph/0506307

[10] R. Santonico, R. Cardarelli. Nucl. Instr. and Meth. A 187 (1981) 377－380

[11] BaBar, Technical Design Report, SLAC-R-95-457, March 1995.

[12] W.J. Llope, et al., Nucl. Instr. and Meth. B 241 (2005) 306.

[13] BELLE Collaboration, KEK Report 95-1, April 1995.

[14] M. Guler et al., CERN/SPSC 2000-028, SPSC/P318, LNGS P25/2000, July 10, 2000; M. Guler et al., CERN/SPSC 2001-025, SPSC/M668, LNGS-EXP 30/2001 Add.1/01, August 21, 2001.

[15] ALICE Collaboration, CERN/LHCC 99-22, 13 August 1999.

[16] ATLAS Muon Collaboration, CERN/LHCC 97-22, 5 June 1997.

[17] CMS Collaboration, CERN/LHCC 97-32, 15 December 1997.

[18] The BESIII detector, IHEP-BEPCII-SB-13, IHEP, Beijing

[19] G. Aielli, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 562 (2006) 92.

[20] F. Anulli, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 515 (2003) 322

[21] J. Zhang, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 540 (2005) 102

[22] J. Zhang, et al., HEP& NP. 27 (7) (2003)

[23] J.Han, et al, Nucl. Instr. and Meth. A 577 (2007) 552

[24] Y.Xie, et al, Nucl. Instr. and Meth. A 599 (2009) 20

[25] Giovanna Travaglia, RPC Ageing, Dimuon Meeting, Berg-en-Dal, June 7th 2004

[26] R. Santonico, Nucl. Instr. and Meth. in Phys.Res. A 508 (2003) 1

[27] H.R. Band, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 594 (2008) 33

[28] A. Candela et. al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 533 (2004) 116

[29] Mengyun Guan et. al, HEP& NP, 28 (11) (2004)

[30] A.Garfagnini, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 572 (2007) 177.

[31] L.Barrera, et al., Study of a new Zig-Zag strip, Daya Bay DocDB 1484-v1(2007)

[32] Guan Mengyun, et al., RPC chamber test, Daya Bay DocDB 1257-v3(2007)

[33] Xie Yuguang, et al., Design Optimization and Prototype Making of RPC Module,Daybay DocDB 1451-v1(2007)

[34] Liang Hao, et al., Design Report of DayaBay Read-Out Module, Daya Bay DocDB 4185-v1(2009)

[35] Yang Heng, et al., Daya Bay RPC Front End Card FDR, Daya Bay DocDB 2432-v1(2008)

[36] J. Zhang, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 540 (2005) 102.

[37] J. Zhang, et al., HEP& NP, 27 (7) (2003).
[38] Bruno G, Eur Phys J C 33, s01, s1032-s1034 (2004) (overview)
[39] M.Abbrescia et al., Nucl. Instr. and Meth, A 359 (1995) 603
[40] Guan Mengyun, et al.,RPC system report, Daya Bay DocDB 4423-v1(2009)
[41] http://en.wikipedia.org/wiki/R134a
[42] H.R. Band, et al, Nucl. Instr. and Meth, A 594 (2008) 33
[43] K. Abe, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 455 (2000) 397.
[44] G. Aielli, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 493 (2002) 137
[45] http://en.wikipedia.org/wiki/SF6
[46] Lu Changguo, RPC gas flammability, Daya Bay DocDB 1705-v1(2007)
[47] M.Abbrescia et al.,Nucl.Instr. and Meth, A 359(1995)603
[48] http://zh.wikipedia.org/zh-cn/数据库
[49] http://www.hudong.com/wiki/数据库
[50] http://zh.wikipedia.org/zh-cn/SQL
[51] http://www.mysql.com/
[52] http://baike.baidu.com/view/24816.htm
[53] http://httpd.apache.org/
[54] http://www.php.net/
[55] http://geant4.cern.ch/
[56] Geant4 User's Guide for Application Developers. http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/index.html
[57] 关梦云，2006 年中国科学院博士论文，“大亚湾反应堆中微子实验本地研究和模型研制”，第三章
[58] T.K.Gasser and T.Stanev, review of particle physics, Phys. Lett. B 592,1(2004)
[59] P.Antonioli, et al., Astropart Phys. 7, 357 (1999)
[60] 占亮，2009 年中国科学院博士论文，“大亚湾中心探测器模拟与物理灵敏度研究”，第三章
[61] Ma Xiaoyan, RPC module, Daya Bay DocDB 2768-v2(2008)
[62] 刘金昌，2008 年中国科学院博士论文，“大亚湾反应堆中微子实验的中子本底研究”，第三章
[63] 路浩奇，2009 年中国科学院博士论文，“大亚湾反符合水契伦柯夫探测器及其模型的研究”，第四章

发 表 文 章

[1]. MA Lie-Hua, et al., A Study of RPC Gas Composition using Daya Bay RPCs (Accepted)

[2]. Jifeng Han, et al., Cosmic ray test results on resistive plate chamber for the BESIII experiments, Nucl. Instr. and Meth. A 577(2007)552

[3]. HAN Ji-Feng, et al.,Quality control and datebase on resistive plate chambers for the BESIII experiment, Chinese Physics C, 2008, 32 (3): 196

[4]. HAN Ji-Feng, et al.,Test of BESIII RPC in avalanche mode, Chinese Physics C, 2008, 32 (5): 373

[5]. Qingmin Zhang, et al., An underground cosmic-ray detector made of RPC, Nucl. Instr. and Meth. A 583(2007)278

[6]. 钱森 等，基于 LabVIEW 设计的 RPC-Gd 热中子探测器测试系统

[7]. Jiawen Zhang, et al., The BESIII muon identificetion system, Nucl. Instr. and Meth. A 614(2010)196

致　　谢

本论文是在高能所的多位老师、同学、同事的指导和帮助下完成的。在此论文完成之际，向所有曾经关心和帮助过我的人表示诚挚的感谢。

首先感谢我的导师王贻芳研究员。王老师知识渊博、视野雄阔，对科研永远严谨而充满热情，对工作兢兢业业、一丝不苟，是我辈学习的典范。感谢王老师在繁忙的工作中仍能抽出宝贵的时间指导我的论文。

衷心感谢我的另一位导师张家文研究员。感谢他悉心指导了我博士期间的工作，以及本论文的撰写。张老师长期工作在科研第一线，具有广博的知识和丰富的经验，在我遇到困难时总能快速高效地找到问题的关键所在，给予我很多启发和帮助。张老师为人乐观开朗，注重因材施教，在传授我知识的同时也让我懂得了不少做人的学问和道理。感谢组里的陈进老师在工作中给予的帮助。同时也感谢初晓梅阿姨在生活上无微不至的关心和照顾，让我在异乡也能感受到家的温暖。

感谢休斯顿大学的 Kwong Lau 教授，普林斯顿大学的陆昌国教授以及查尔斯大学的 Vit Vorobel 教授的宝贵指点，让我受益良多。同时也要感谢高能所的曹俊研究员，杨长根研究员，王萌研究员，陈元柏研究员，吕军光研究员，胡涛研究员以及欧阳群研究员。

诚挚地感谢休斯顿大学的 Logan 博士，能与他一起工作是我博士期间最大的幸事之一。Logan 思维严谨而慎密，对待科研一丝不苟的精神令人佩服。在共同奋战 RPC 的一年多时间里，我们相互帮助、共同探讨，使我得到了很大的进步。同样还要感谢查尔斯大学的 Viktor 博士在实验上给予的帮助，他的天赋和幽默也令人印象深刻。

感谢 Muon 组的师兄谢宇广、韩纪峰、张清民和钱森给予的帮助和支持。正是由于几位师兄的帮助，我才能慢慢成长起来，学习到实验的技巧和科研的本领。同时也感谢我的师弟宁哲，在工作中给予我得力的帮助。

感谢大亚湾组的关梦云、刘金昌、钟玮丽、王志民、路浩奇、丁雅韵、占亮、温良剑、季筱璐、徐吉磊、张书华、王玲玉、李小波、蒋文奇、索伦、安丰鹏、张一纯、于泽源、章飞虹、陈晓苏、夏冬梅等同事在工作中的帮助和支持。特别感谢刘金昌、路浩奇以及徐吉磊在模拟工作方面的大力帮助和讨论以及室友温良剑在学术上的有益探讨，使我受益匪浅。在此也感谢不能一一提及姓名的大亚湾组其他曾帮助过我的同事们。

特别感谢韩玲老师在生活上对我的深切关心和照顾以及工作中的大力支持。也感谢牛卫平老师、杨彪老师、崔家安和高能科迪苏民发高工及员工们在工作上的支持。

感谢探一组的樊瑞睿、徐品、吕新宇、刘贲、田力朝、范胜男、韩晨霞、赵中亮以及已经毕业的王小胡、董静、田建民等同事，一起营造了轻松良好的工作氛围。

感谢研究生部、中心办公室以及其他部门的老师们的辛勤劳动。

最后，感谢我的父母和未婚妻一直以来的关心和支持，你们永远是我前进的动力。