

分类号 _____

密级 _____

U D C _____

编号 _____

中国科学院研究生院
博士学位论文

大亚湾RPC探测器性能及其对本底测量的研究

徐 吉 磊

指导教师: 杨长根 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: 2011年4月 论文答辩日期: 2011年05月

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: _____

RPC module Detector of Daya Bay and its measurement for background

Xu Jilei

In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy



Graduate School of Chinese Academy of Sciences
Beijing, China

2011

(Submitted in April 2011)

© 2011
Xu Jilei
All Rights Reserved

研究生学位论文声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签名：_____日期：_____

关于学位论文使用授权的说明

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

签名：_____日期：_____

谨将此文献给尊敬的杨长根老师

摘 要

中微子物理是当今粒子物理、天体物理与宇宙学的交叉前沿与实验研究的热点。中微子混合角 θ_{13} 是中微子物理的基本参数之一，其数值的大小将决定未来中微子物理的发展方向。反应堆中微子实验是精确测量 θ_{13} 的主要途径之一。大亚湾中微子实验利用我国深圳大亚湾核电站群精确测量 $\sin^2(2\theta_{13})$ 。为了达到 0.01 测量灵敏度的物理目标，必须将实验的本底压低到满足物理要求，优化探测器设计，提高反符合探测器的探测效率。

大亚湾中微子实验使用水契伦科夫和 RPC 双重探测器来给出 μ 子的反符合(veto)信号。本论文主要阐述大亚湾实验 RPC 探测器方面的设计、测量、计算和模拟。包括模块单元的设计，模块的机械强度测试，如形变和抗震动能力等。

在模拟方面，得到了大亚湾 RPC 探测器在单层效率 95% 的情况下的整体效率 $> 96\%$ ，结果满足大亚湾的设计要求。优化探测器模块的摆放，对不同的实验点采取不同的摆放，优化后可以提高约 0.5% 的 RPC 整体效率。

在模块测量方面，对模块进行了详细的性能研究，给出模块生产的质量控制标准，对模块性能进行了详细的统计。同时对模块测量系统的气体、电子学等方面也进行了研究，各个部分能够正常工作，使整个测量系统成为一个有机的整体，为将来大亚湾 RPC 系统的运行提供了经验。

提出在大亚湾每个实验大厅增加两块望远镜 RPC，给出设计，并进行了详细的模拟和研究。增加望远镜 RPC 可以扩充大亚湾实验的研究内容，如精确测量地下 μ 子角分布，中子本底，对水池纯净水的质量监测等。更为重要的是提供了测量岩石中子的实验手段，望远镜 RPC 可以为提高 θ_{13} 的测量精度做出贡献。

关键字: 中微子; 大亚湾中微子实验; RPC; RPC 模块; 模块效率; 望远镜 RPC; 本底模拟。

Abstract

Neutrino physics is the frontier of particle physics, astrophysics and cosmology. The neutrino mixing angle θ_{13} is one of the fundamental parameters of the neutrino physics. The magnitude of θ_{13} will decide the future direction of the neutrino physics. The Daya Bay neutrino experiment is proposed to measure the parameter $\sin^2(2\theta_{13})$ precisely using the reactor cores at Daya Bay, in Shenzhen, Guangdong Province. To reach the sensitivity of 0.01, one has to study the backgrounds of the experiment in details, to optimize the design of the detector, and improve detect efficiency.

Two independent veto detectors are utilized in the experiment, the water Cerenkov detector and RPC detectors, to give muon veto signals and suppress backgrounds. This thesis mainly describes RPC detector's design, measurement, calculation and simulation. It includes the design of modular unit, mechanical strength test, such as deformation and vibration capabilities. In terms of simulation, the RPC system efficiency will be larger than 96% if the bare RPC's efficiency reach 95%, this can meet Daya Bay requirements. The lay direction of RPC modules has been also optimized, this can enhance 0.5% overall efficiency in each hall.

In terms of module test, the performance RPC module has been studied in detail, and the working point of the module, the production quality control standards, the statistics also have been given out. Meanwhile, we also do some research on gas sytem and electronics in module testing system, make sure all parts can working well together. This work provide us valuable experience for the Daya Bay RPC detector commission.

We propose adding two telescope RPC modules in each experimental hall, and have given the design in detail, and also have done simulation and research in detail. Two telescope RPC modules can fulfil the requirements of many additional researches, such as accurate measurement of underground muon angle distributions, neutron backgrounds, monitoring the water quality and so on. The more important is the telescope RPC modules provide an efficient method to measure the rock neutron backgrounds, which are difficult to estimate without measurements and induce large systematic uncertainties, this the modules would contribute a lot to the measurement of θ_{13} .

Key words: neutrino; Daya Bay neutrino experiment; RPC; RPC module; module efficiency; telescope RPC; background simulation

目 录

第 1 章 中微子及其实验概况	1
1.1 引言	1
1.2 中微子振荡	2
1.3 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量	6
1.4 反应堆中微子实验	9
1.4.1 反应堆中微子的探测原理	9
1.4.2 反应堆中微子实验进展	9
1.5 论文选题的目的和结构	11
1.5.1 论文选题的目的	11
1.5.2 论文选题的结构	11
第 2 章 大亚湾反应堆中微子实验	13
2.1 实验简介	13
2.2 实验设计	14
2.2.1 探测器设计	16
2.2.2 中心探测器	16
2.2.3 反符合探测器	18
2.2.3.1 反符合探测器的选型	19
2.2.3.2 反符合探测器的介绍	20
2.3 大亚湾实验本底误差和预期目标	22
第 3 章 大亚湾 RPC 探测器的制作	25
3.1 RPC 探测器介绍	25
3.2 大亚湾 RPC 探测器的设计	27

3.2.1	模块单元大小和层数的设计	28
3.2.2	模块单元内部的设计研究	30
3.2.2.1	裸室的摆放	31
3.2.2.2	信号的读出设计	33
3.2.2.3	气路和高压	35
3.2.2.4	形变测试	36
3.2.3	单模块整体介绍	38
3.3	大亚湾 RPC 裸室的制作	40
3.4	模块的制作	42
3.4.1	读出条的刻录	42
3.4.2	组装前组件的准备	43
3.4.3	模块组装	44
3.4.4	工艺要求	45
3.5	本章总结	46
第 4 章	RPC 探测器的测量	47
4.1	RPC 裸室的测量	47
4.2	RPC 模块的测量	48
4.2.1	RPC 模块测试系统的介绍	49
4.2.1.1	气体系统	49
4.2.1.2	电子学系统	52
4.2.1.3	高压系统	54
4.2.2	模块测量的步骤和质量控制	55
4.2.3	信号测量	56
4.2.3.1	模块读出道的单计数	57
4.2.3.2	读出道的 Cross Talk	58
4.2.4	Trigger 模块及电子学的验证	60
4.2.4.1	闪烁体符合测量	60
4.2.4.2	外触发测量	62
4.2.5	振动测试	64
4.2.6	通气测试	65

4.2.7	数据分析	66
4.2.7.1	事例选择的判选 (cut) 条件	66
4.2.7.2	阈值和高压的选择	67
4.2.7.3	小块效率分析与统计	68
4.2.8	模块效率统计	69
4.2.9	每道的计数统计	70
4.2.10	实验环境参数的监测	71
4.2.11	μ 子径迹长度跟效率的关系	73
4.2.12	模块在现场的检查测量	74
4.3	本章总结	76
第 5 章	RPC 探测器性能的模拟研究	79
5.1	RPC 模拟平台	79
5.2	地下高精度 μ 子样本	80
5.2.1	精确模拟地下 μ 子角分布	80
5.2.1.1	低精度 μ 产生子	80
5.2.1.2	使用高精度地图得到地下 μ 子角分布	80
5.2.2	μ 子正负比	86
5.2.2.1	μ 子正负比的选取	86
5.2.2.2	测量 μ 子正负比的一个方法	87
5.3	单元模块的模拟计算	91
5.4	RPC 地毯式阵列的模拟和性能的研究	93
5.4.1	模块间的重叠	93
5.4.2	RPC 地毯式阵列的模拟	94
5.4.3	两种裸室和一种裸室的系统效率对比	99
5.4.4	垫片 (spacer) 的影响	100
5.4.5	RPC 倾角朝向	102
5.4.6	其他的触发模式	103
5.5	本章总结	105
第 6 章	望远镜 RPC 及其对本底的研究	107

6.1 望远镜 RPC 的提出	107
6.2 望远镜 RPC 的设计	108
6.3 望远镜对 μ 子角分布的探测	109
6.4 对水池的监测	111
6.5 对中子本底的探测	112
6.5.1 中子本底	112
6.5.2 岩石中子本底	114
6.6 本章总结	117
 第 7 章 总结与展望	 119
 参考文献	 121
 致 谢	 137

第 1 章 中微子及其实验概况

1.1 引言

近一个世纪以来，人们对中微子经历了从发现，到逐渐了解，到现在的精确测量阶段。中微子是物质世界的基本粒子，其中性、手征性、混合性等一系列的特点和具有标准模型很难解释的秘密，使其成为粒子物理学最活跃和最多产的领域之一。特别是中微子振荡的发现，揭示了中微子的非零质量和味混合的性质，近十多年来，中微子已经成为物理学理论和实验的热门研究领域 [1]，并在粒子物理中逐渐形成了专门的研究分支——中微子物理（Neutrino physics）。

二十世纪初期测定射线能谱的研究相继证实 α 和 γ 射线的能谱同原子光谱一样呈线状分布，1914年英国科学家查得威克（J. Chadwick）用计数器和电离室观测到 β 射线的能谱，出人预料地发现其呈连续分布 [2]。在随后的十几年里，人们对连续谱做了种种解释，以至于“能量和动量守恒”都要面临严峻挑战。为了“拯救”能动量守恒，1930年泡利（W. Pauli）提出一个假说，认为 β 衰变释放出一种类似于“中子”的粒子。这种粒子自旋为 $1/2$ ，质量很小，相互作用很弱，很难被实验观测到 [3]。后来费米（E. Fermi）命名它叫中微子（neutrino）并指出它可能是没有质量的 [4]。中国物理学家王淦昌在 1942 年第一个提出用轻核的 K 壳层电子俘获的方式来探测中微子 [5]，后来还提议使用重核裂变的方式来探测 [6]。

1956 年莱因斯（F. Reines）和考恩（C. Cowan）等人第一个使用反应堆中微子实验探测到中微子信号 [7]。这就是我们后来知道的反电子中微子（1995 年诺贝尔奖）。同年，杨振宁和李政道提出弱相互作用宇称不守恒 [8]，并为实验所证实 [9]。这成为随后建立的弱相互作用的 V-A 理论 [10] 和描述中微子二分量 [11] 的基础。中微子的二分量理论认为中微子是无质量的二分量旋量粒子，具有手征性。1962 年莱德曼（L.M. Lederman）、斯瓦兹（M. Schwartz）和斯坦伯格（J. Steinberger）发现了 μ 中微子 [12]（1988 年诺贝尔奖）。随后标准模型逐渐建立 [13–15]，将粒子分为三代，并能很好的将各种粒子统一起来，而且能被实验所证实 [16]。第三代的 τ 中微子的标准模型理论预言，最终在 2001 年被费米实验室的 DONUT 合作组

找到 [17]。在三代费米子的标准模型中，中微子的质量仍然为零，只具有左手中微子，在相互作用中轻子数守恒，中微子不会从一种类型变成另一种类型。

但是随着中微子味道混合概念的提出 [18] 和理论的发展 [19]，特别 1998 年 Super-K 实验以确凿的证据观测到了中微子振荡 [20]，并提供了精确的大气中微子振荡的参数，超标准模型的预言才第一次从实验数据上验证并令人信服。随后长基线加速器 K2K 实验 [21] 和 MINOS 实验 [22] 精确验证了这一振荡参数。特别是 2002 年的 SNO 实验 [23] 给出了太阳中微子从 ν_e 到 ν_μ 和(或) ν_τ 转化的证据，验证了太阳的标准模型 [24] 的正确性。随后，KamLAND 实验 [25] 使用反应堆进一步证实了 SNO 的振荡参数。到此，较早的 Kamiokande [26]、IMB [27] 等实验的“大气中微子反常”和 Homestake [28] 的“太阳中微子失踪之谜”已经在中微子振荡的框架下得到了满意的解答。这样中微子不同味本征态之间的相互转换，已经被大气中微子实验、太阳中微子实验、反应堆中微子实验、加速器中微子实验所证实，实验结果在三代中微子振荡的理论框架下得到了很好的解释 [29]。

中微子振荡的发生，即意味着中微子静止质量不再为零，预示着存在超出标准模型的新物理。虽然人们对中微子振荡有了较好的理解，但是中微子味道混合的很多参数还不够精确、绝对质量还不知道。为了测量中微子的基本参数，当前有很多中微子实验正在设计、建造、运行中。这有助于我们探索超出标准模型之外的新物理、解释宇宙的构成、物质与反物质的不对称性等。

大亚湾实验 [30] 就是一个精确测量中微子的混合角 θ_{13} 的实验。 θ_{13} 的值是未来中微子新物理图像的线索。 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的大小将直接决定解释正反物质不对称性的 CP 破坏相角的测量方式，是中微子实验进程的转折点，所以对 θ_{13} 的测量意义重大。而在中国，大亚湾实验是第一个进行中微子测量的国际大实验，其将开辟中国进行中微子精确测量的新纪元 [31]。

1.2 中微子振荡

假设存在三代中微子，标记其质量本征态为 ν_1, ν_2, ν_3 ，味道本征态为 ν_e, ν_μ, ν_τ 。中微子的弱相互作用味本征态是质量本征态的线性组合，即：

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad (1.1)$$

式中， $\alpha = e, \mu, \tau$ 是中微子的味道量子数， $i = 1, 2, 3$ 是中微子的质量量子数，么正矩阵 U 是轻子味混合矩阵 Maki-Nakagawa-Sakata(MNS) [32,33]。

态 $|\nu_i\rangle$ 随时间的演化遵守 *Schrödinger* 方程。在 ν_i 静止的坐标系中，设时间为

τ_i ，对应的中微子质量为 m_i ，得到关系：

$$|\nu_i(\tau_i)\rangle = e^{-im_i\tau_i} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.2)$$

在实验室坐标系中，对应的时间为 t ，中微子运动的距离为 L ，根据 Lorentz 不变性，有以下关系成立：

$$e^{-im_i\tau_i} = e^{-i(E_it - P_iL)} \quad (1.3)$$

式中， E_i 和 P_i 是指在实验室坐标系中中微子的能量和动量。由于中微子是极端相对论性粒子，满足关系： $t \approx L$ 。中微子 ν_α 产生时的动量为 P ，可以认为不同质量本征态的中微子均具有这个动量值；另外，可以假设中微子的质量相对于它们的能量来说很小，下面的关系成立：

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx P + \frac{m_i^2}{2P} \quad (1.4)$$

方程 1.2 在实验室坐标系中的对应形式就变成为：

$$|\nu_i(\tau_i)\rangle \approx e^{-i\frac{m_i^2}{2P}L} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.5)$$

$E \approx P$ ，定义为不同质量本征态中微子的平均能量，推导出方程 1.6

$$|\nu_\alpha(L)\rangle \approx \sum_\beta \sum_1 U_{\alpha i}^* e^{-im_i^2 \frac{L}{2E}} U_{\beta i} |\nu_\beta\rangle \quad (1.6)$$

这个方程描述了经过距离 L 后中微子味道量子数的混合。根据量子物理学的基本原理， $|\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(L) \rangle|^2$ 表示经过距离 L 后，中微子 ν_α 变成 ν_β 的几率，方程 1.7 列出了这个几率的数学表达式 [34]。

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} \\ &-4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left[1.27 \Delta m_{ij}^2 \left(\frac{L}{E} \right) \right] \\ &+2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left[2.54 \Delta m_{ij}^2 \left(\frac{L}{E} \right) \right] \end{aligned} \quad (1.7)$$

式中， $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$ ，单位是 eV^2 ， L 的单位是 km ， E 的单位是 GeV ，常数 1.27 来自于单位制的换算。更详细的推导见参考文章 [35]。如果 CPT 变换守恒，对于中微子振荡，存在以下关系：

$$P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) = P(\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha) \quad (1.8)$$

另一方面，从方程 1.7 中得到：

$$P(\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha, U) = P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta, U^*) \quad (1.9)$$

如果 CPT 变换守恒，中微子振荡将遵守变换关系 1.10。

$$P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta, U) = P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta, U^*) \quad (1.10)$$

这个关系说明，在混合矩阵 U 取其复共轭后，反中微子的振荡几率与中微子的振荡几率相等。如果混合矩阵 U 的矩阵元不是实型的，公式 1.7 中的最后一项将在取复共轭后有不同的符号，反中微子和中微子的振荡几率不相等。由此，如果 CPT 变换守恒，以上这些振荡几率间的差别将意味着 CP 变换的不守恒 [34]。

轻子的混合矩阵 (MNSP 矩阵) 可以参数化为如下形式 [36, 37]，见方程 1.11：

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} e^{i\phi_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\phi_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

式中， $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ ， $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ ， $(i, j = 1, 2, 3)$ 。按照这种参数化后的中微子混合矩阵可以直观地给出很多物理现象的解释。

1. 方程 1.11 的最后一项是一个对角矩阵。由公式 1.7 看出，这一项不会影响中微子振荡几率，在中微子振荡实验中不能测量出 ϕ_1, ϕ_2 的值。从物理意义来看，参数 ϕ_1, ϕ_2 描述 Majorana 中微子（定义：中微子和它的反粒子是同一种粒子的中微子称为 Majorana 中微子），它们产生的效应可以在无中微子发射的双 β 衰变 (neutrinoless double beta decay) 中观测到。
2. CP 破坏效应由 Jarlskog 不变量表示 [38]。从 U 矩阵的么正性可知，在三种味道中微子振荡模式中，只有一个 Jarlskog 不变量。按照以上的参数化方法，Jarlskog 不变量定义为：

$$J_{CP} = s_{12}c_{12}s_{23}c_{23}s_{13}c_{13}^2 \sin \delta \quad (1.13)$$

这个关系表明，中微子振荡实验中的 CP 破坏效应正比于 $\sin \delta$ ，公式 1.11 中的 δ 是 CP 相角。通过中微子振荡实验，可以测定 CP/T 破坏的大小。从上面的公式还可以看出：CP 相角和中微子混合角共同决定 CP 破坏的大小，这个结论表明存在参数简并的麻烦。

3. 从群论的观点看，方程 1.11 的前三项各定义了一个转动角，它们对应三代中微子间的混合角。方程 1.11 中的中微子混合角和公式 1.7 中的中微子质量平方差对应中微子振荡实验的测量量有如下关系：

$$\begin{aligned}\Delta m_{21}^2 &= \Delta m_{solar}^2, \\ \Delta m_{32}^2 &= \Delta m_{atom}^2, \\ \theta_{12} &= \theta_{solar}, \\ \theta_{23} &= \theta_{atom}, \\ \theta_{13} &= \theta_{reactor}.\end{aligned}\tag{1.14}$$

式中的 solar 代表太阳中微子实验，atom 代表大气中微子实验，reactor 代表反应堆中微子实验。当前的太阳中微子实验测量精度最高的结果来自 KamLAND 和 SNO 两个实验组 [39, 40]，逼近的最佳实验结果如下：

$$\begin{aligned}\Delta m_{21}^2 &= 7.59_{-0.21}^{+0.20} \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \\ \theta_{12} &= 34.06_{-0.84}^{+1.16} \text{ 度}\end{aligned}\tag{1.15}$$

当前的大气中微子实验最精确的测量结果来自 MINOS [41]：

$$\begin{aligned}|\Delta m_{32}^2| &= (2.43 \pm 0.13) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ (68\% 置信区间)}, \\ \sin^2(2\theta_{23}) &> 0.90 \text{ (90\% 置信区间)}\end{aligned}\tag{1.16}$$

其在 90% 置信区间与 Super-K [42]、K2K 两个实验组 [43] 的结果相符合。

当前的反应堆中微子实验测量精度最高的结果来自 CHOOZ 实验 [44]：

$$\begin{aligned}\text{在 } |\Delta m_{31}^2| &= 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ 下}, \\ \sin^2(2\theta_{13}) &< 0.15 \text{ (90\% 置信区间)}\end{aligned}\tag{1.17}$$

由于中微子共三代，有约束条件 1.18 成立。

$$\Delta m_{21}^2 + \Delta m_{32}^2 + \Delta m_{31}^2 = 0\tag{1.18}$$

涉及到中微子振荡实验的参数共有六个，它们是：

$$\Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2, \sin^2(\theta_{12}), \sin^2(\theta_{23}), \sin^2(\theta_{13}), \delta\tag{1.19}$$

当前的实验已经确定了以上六个参数中的三个半： Δm_{21}^2 , $|\Delta m_{32}^2|$, $\sin^2(\theta_{12})$, $\sin^2(\theta_{23})$ 。还有两个半参数有待测量，它们是：

$$|\Delta m_{32}^2| \text{ 的符号, } \sin^2(\theta_{13}), \delta \quad (1.20)$$

从结果 1.15、1.16 中看到，

$$\frac{\Delta m_{12}^2}{|\Delta m_{32}^2|} \sim 10^{-2} \quad (1.21)$$

综合方程 1.18 得到：

$$|\Delta m_{32}^2| \approx |\Delta m_{31}^2| \quad (1.22)$$

从这个关系看出，描述中微子振荡的两个中微子质量平方差参数约相差两个数量级。结合公式 1.7，当中微子振荡实验的 L/E 满足关系：

$$\frac{\Delta m^2 L}{E} = o(1) \quad (1.23)$$

时，三代中微子振荡近似变成两种中微子间的味道混合。在方程 1.11 所示的 MNSP 矩阵参数化条件下，公式 1.7 近似变成如下形式：

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2[1.27\Delta m^2 L/E] \quad (\alpha \neq \beta) \quad (1.24)$$

和

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2[1.27\Delta m^2 L/E] \quad (1.25)$$

方程 1.24 描述中微子的产生（appearance）几率，方程 1.25 描述中微子的消失（disappearance）几率，它们是实验中经常用到的两个公式。

1.3 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量

对 θ_{13} 的最直接测量是使用反应堆中微子实验测量反电子中微子的丢失，其振荡公式可以由方程 1.11 参数化后得到 [45]：

$$\begin{aligned} P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 & - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2[1.27\Delta m_{21}^2 L/E] \\ & - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2[1.27\Delta m_{32}^2 L/E] \end{aligned} \quad (1.26)$$

当选取合适的基线长度（探测器和反应堆的距离 $L < 5 \text{ km}$ ）时，上式中的第二项可以忽略不计，公式 1.26 简化为公式 1.25，即变成二种中微子振荡的形式。由反应堆中微子振荡公式看出，公式中不存在 δ 相角，所以使用反应堆发出的反电子中微子探测中微子振荡效应不存在参数简并的问题，只要实验精度足够高，给出反电子中微子的剩余几率，就可以确定 θ_{13} 的值。

CHOOZ 实验给出了当前 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的最小上限的最好结果（见方程 1.17）。如果 θ_{13} 等于零，从方程 1.13 中看到，中微子振荡的 Jarlskog 不变量等于零，这表明中微子振荡实验测量不到轻子的 CP 破坏。反应堆中微子实验如果可以测定 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的大小不为零，就可以确定今后的中微子振荡实验有望测量轻子的 CP 破坏。

加速器实验也可以测量 θ_{13} 的值，但是具有一定的缺陷。加速器实验使用人工 ν_μ 束流，经过一定的距离后用探测器测量 ν_e 或者 ν_τ 的产生几率。不考虑物质效应和 CP 相角情况下，这些产生几率近似表示为 [45]：

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta_{23} \cos^4 \theta_{13} \sin^2[1.27\Delta m_{32}^2 L/E] \quad (1.27)$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{12} \sin^2[1.27\Delta m_{32}^2 L/E] \quad (1.28)$$

由于 θ_{13} 很小，对于 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 的中微子产生实验，可以测量到二种中微子混合的效应。而 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 的振荡过程可以测量 θ_{13} 和 CP 相角，完整的振荡几率为：

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2[1.27\Delta m_{32}^2 L/E] \\ & + \sin^2 2\theta_{13} \cos^2 \theta_{23} \sin^2[1.27\Delta m_{21}^2 L/E] \\ & - (+)J \sin(\delta) \sin[1.27\Delta m_{32}^2 L/E] \\ & + J \cos(\delta) \cos[1.27\Delta m_{32}^2 L/E] \end{aligned} \quad (1.29)$$

式中的 J 为 Jarlskog 不变量，对于中微子的振荡第三项取负，对于反中微子的振荡第三项取正 [45]。尽管加速器实验由于实验过程，本底控制起来容易，实验上可以达到很高的精度，但是从公式 1.29 中看出，加速器中微子实验测量 θ_{13} 时，面临的一个最大的困难是参数的简并问题。潜在的三种参数简并是 [46]：（i） (δ, θ_{13}) 不确定，（ii）中微子质量等级不确定（ Δm_{32}^2 的符号不确定），（iii） $(\theta_{23}, \frac{\pi}{2} - \theta_{23})$ 不确定。这些都导致推断 δ_{CP} 和 θ_{13} 是很困难的。

对比式 1.29 和式 1.26 知道，如果通过反应堆中微子实验得到 $\sin^2 2\theta_{13}$ 大于 0.01，那么加速器实验（式 1.29）就可能测量到关系 CP 破坏的相角 δ 。如果 $\sin^2 2\theta_{13}$ 在 90% 置信区间内小于 0.01，那么整个实验就对目前的加速器技术和探测器性能提出更高的要求，需要用更强中微子源和更低本底的实验如 β 束流和中微子工厂来测量 CP 破坏相角 [47]。所以 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的大小对今后的加速器中微子实验将会有重要的指导意义。

从目前已有的中微子振荡实验结果，包括太阳中微子实验、大气中微子实验、和反应堆中微子实验，可以根据三代中微子味混合的理论，可以综合分析出一个 θ_{13} 的大致范围，为新的实验设计提供指导。参考文章 [48] 中对现有的实验数据作了分析，给出了 θ_{13} 大小的限制，如图 1.1。在 90% 和 (3σ) 置信区间给出各个实验数据的最佳值：

$$\sin^2 \theta_{13} \leq \begin{cases} 0.053 \text{ (0.078)} & (\text{solar} + \text{KamLAND}) \\ 0.033 \text{ (0.061)} & (\text{CHOOZ} + \text{atm} + \text{K2K} + \text{MINOS}) \\ 0.034 \text{ (0.053)} & (\text{global data}) \end{cases} \quad (1.30)$$

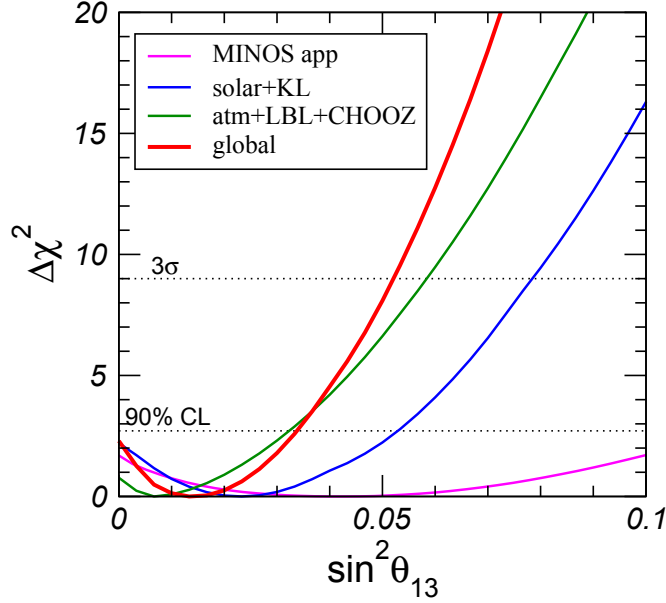


图 1.1: $\Delta\chi^2$ 随 $\sin^2 \theta_{13}$ 的变化曲线。数据来自 MINOS ν_e 的 appearance, 太阳中微子 + KamLAND, 大气中微子 + CHOOZ + K2K + MINOS (包括 ν_e 的 appearance 和 disappearance)。

这篇文章的分析还给出了五个参数 (θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} , Δm_{21}^2 , Δm_{32}^2) 的最佳拟合值, 见表 1.1。可知, 目前最终的 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的最佳拟合值约为 0.05。

Parameter	Best fit	2σ	3σ
Δm_{21}^2 (10^{-5} eV^2)	$7.59^{+0.23}_{-0.18}$	7.22 - 8.03	7.03 - 8.27
$ \Delta m_{31}^2 $ (10^{-3} eV^2)	$2.40^{+0.12}_{-0.11}$	2.18 - 2.64	2.07 - 2.75
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.318^{+0.019}_{-0.016}$	0.29 - 0.36	0.27 - 0.38
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.50^{+0.07}_{-0.06}$	0.39 - 0.63	0.36 - 0.67
$\sin^2 \theta_{13}$	$0.013^{+0.013}_{-0.009}$	≤ 0.039	≤ 0.053

表 1.1: 三代中微子混合条件下, 最佳拟合值 (Best fit) 带 1σ 的误差和 2σ 、 3σ 间隔下中微子振荡参数的最佳拟合值。

1.4 反应堆中微子实验

1.4.1 反应堆中微子的探测原理

反应堆中微子实验利用核反应产生的反电子中微子与质子的反 β 衰变（方程式 1.31），测量末态 e^+ 和 n 信号及其时间关联来推测剩余反电子中微子数目。

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad (1.31)$$

反 β 衰变的能量阈值为 [49]:

$$E_{\bar{\nu}_e}^{thr} = \frac{(M_n + m_e)^2 - M_p^2}{2M_p} = 1.806 \text{ MeV} \quad (1.32)$$

可观测到的能量为:

$$E_{vis} \approx E_{\bar{\nu}_e} - 0.8 \text{ MeV} \quad (1.33)$$

Reines 和 Cowan 的实验组 [50]，CHOOZ 实验、Palo Verde 实验和大亚湾实验都是利用这一原理。

1.4.2 反应堆中微子实验进展

裂变核反应堆通过 β 衰变产生大量各向同性的中微子，平均每次核裂变产生约 200 MeV 能量，释放出 6 个反电子中微子 [49]。反应堆中微子的能量分布，相应能

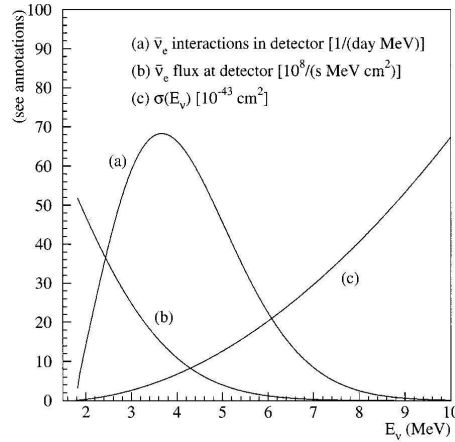


图 1.2: 反应堆中微子的能谱和反 β 衰变的反应截面 [49]

量范围中反 β 衰变的反应截面以及在以反 β 衰变为探测原理的探测器中探测到的反电子中微子能谱如图 1.2 所示。图中曲线(a)和(b)的纵坐标值为对应有效靶质量为 12 吨的探测器在距离 12 GW 热功率的反应堆 800 米处探测器的响应。图中显示，反应

堆中微子的能量只有几个 MeV。

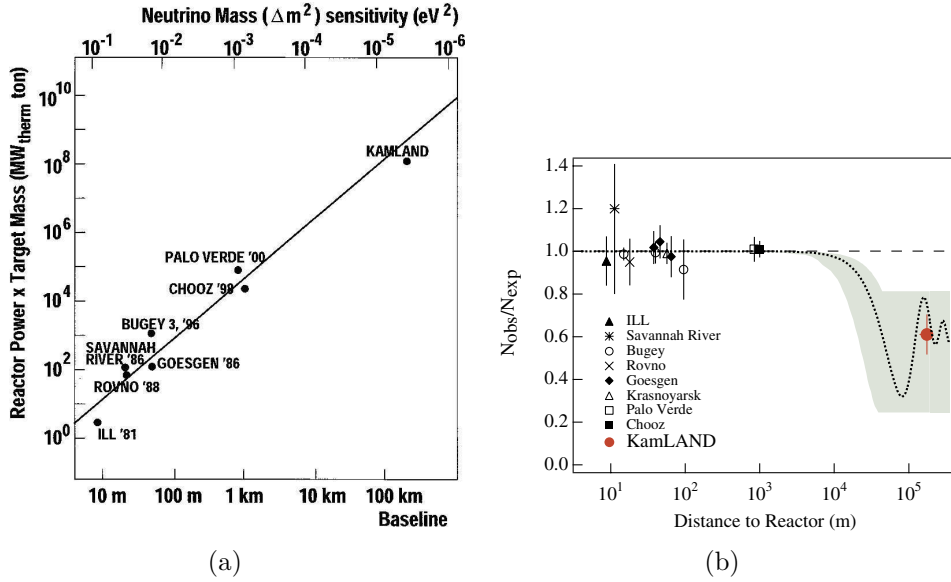


图 1.3: 过去的反应堆中微子实验总结

从 1953 年 [50] 至今, 利用反应堆测量中微子一直是中微子实验测量的主要方法之一。图 1.3 总结了过去的反应堆中微子实验。图 1.3(a) [49] 表示的是中微子振荡参数 Δm^2 的测量精度和反应堆热功率、中微子探测器有效靶质量以及实验的基线长度间的关系。图中的圆点表示各个反应堆中微子实验在图上的位置, 实验名称和实验进行的大致时间一并列出。

在图 1.3(b) [51] 中, 横坐标是反应堆中微子实验的平均基线长度, 纵坐标是反电子中微子的测量值和期望值的比值。图中的阴影部分表示置信水平为 95% 的中微子大角度混合 (LMA) 的区间 [52], 点曲线表示的是振荡几率随基线长度的变化关系, 它服从公式 1.25, 取太阳中微子振荡结果为: $\Delta m^2 = 5.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ 和 $\sin^2 2\theta = 0.833$, 短虚线表示的是没有振荡的情形。图中带误差棒的点代表历年来各个反应堆中微子实验在图中所处的位置。图中所涉及到的中微子实验详情见参考文献 [53]。

以上两个图中 Savannah River 是 F. Reines 于 1995 年获得 Nobel 奖的中微子实验 [7] 使用的核电站名称。图中的信息表明, 这些中微子实验的基线长度从 10 米量级到 100 公里量级, 越是进行得晚的实验, 反应堆热功率与中微子探测器有效靶质量的积就越大。为了提高实验精度, 反应堆中微子实验需要设计最佳的基线长度和更大的探测器有效靶质量, 并选择高热功率的反应堆。

从过去的实验分析，反应堆中微子实验的系统误差主要来自于三个不同的方面：1) 反应堆相关的系统误差，其大小为 2-3%，包括反应堆的热功率、每次裂变的能量差别等造成的系统误差；2) 本底相关的系统误差，约为 3% 之内；3) 探测器相关的系统误差，约为 1-3%，包括反 β 衰变的反应截面、总质子数、探测效率等造成的系统误差。这些结果给今后的反应堆中微子实验提供了改进实验设计的途径，同时也说明只有进一步降低实验的系统误差，才能够做到更精确的 $\sin^2(2\theta_{13})$ 的测量。

1.5 论文选题的目的和结构

1.5.1 论文选题的目的

中微子混合角 θ_{13} 是中微子物理的基本参数之一，其数值的大小将决定未来中微子物理的发展方向。对其的测量是当前国际竞争的热点。利用反应堆测量 θ_{13} 不存在参数简并，实验投入小，是目前测量 θ_{13} 的最有效的办法。大亚湾中微子实验利用大亚湾核电站的大功率，周围得天独厚的山体覆盖，来测量 θ_{13} 的值，设计目标比目前最好的 CHOOZ 结果高一个量级，达到 $\sin^2(2\theta_{13})$ 0.01 的目标。这对实验本底屏蔽和探测要求较高。要求双重反符合探测器联合对 μ 子产生中子本底的有效探测效率达到 99.5%。RPC 探测器的探测效率达到 90-95%。本篇论文是针对实验中双重反符合探测器中的 RPC 探测器进行优化设计、测量和研究。

1.5.2 论文选题的结构

本论文对大亚湾反符合探测器中的 RPC 探测器的设计和优化，以及性能的模拟进行了详细的讨论。对 RPC 模块探测器进行了细致的测量和研究，进行严格的质量控制。对搭建的模块测量的各个系统进行了详细的研究，对大亚湾的 RPC 探测的运行具有借鉴意义，也是大亚湾的 RPC 探测器顺利运行的保证。提出增加望远镜 RPC，对岩石中子本底的测量具有重要意义。

按照章节分，论文的结构如下：

第一章，介绍中微子物理及中微子实验的概况和进展。

第二章，介绍大亚湾中微子实验。

第三章，介绍大亚湾 RPC 探测器的设计和制作。

第四章，描述对 RPC 探测器性能进行的各方面测量，及质量控制等。

第五章，描述对 RPC 探测性能的模拟研究。包括模块单元的研究和地毯式阵列的研究等。

第六章，介绍望远镜 RPC 及其对本底测量的研究。包括望远镜 RPC 的摆放设计，对 μ 子角分布、中子本底、岩石中子本底的测量等方面的模拟。

第七章，总结与展望。

第 2 章 大亚湾反应堆中微子实验

2004年各国科学家联合发表了使用反应堆测量 θ_{13} 的白皮书 [54]。用反应堆精确测量 θ_{13} 已经成为国际粒子物理实验的热点。由于其科学意义重大，七个国家先后提出了八个实验建议，目前还在继续推进的有三个。由于得天独厚的地理优势和精密的探测器设计，大亚湾中微子实验是仍在推进中的设计精度最高的实验。要求 $\sin^2 2\theta_{13}$ 测量的灵敏程度达到 0.01 以下。

2.1 实验简介

大亚湾中微子实验位于离深圳几十公里的大亚湾。大亚湾目前共有 4 个核反应堆，分为大亚湾和岭澳两处，每处各两个反应堆，相距 1 千米，东南面临海，西北面靠山，山的最高处为海拔 700 米。两个核电站各有两个热功率为 2.9 GW 的反应堆，共 11.6 GW，加上马上运行的岭澳二期工程的两个反应堆，总功率可达 17.4 GW。大亚湾核电站的实景图片如图 2.1 所示，



图 2.1: 大亚湾核电站的实景图片

从实验选址观点来看, 附近临山有足够的岩石覆盖, 给大亚湾反应堆中微子实验提供了有利的条件, 而且核电站的热功率大, 二期建成之后将成为世界第二大功率核电站。

大亚湾反应堆中微子实验的主要目的是精确测量 θ_{13} , 精度比之前的实验高一个量级, 在 90% 的置信区间内 $\sin^2 2\theta_{13}$ 达到 0.01。大亚湾反应堆中微子实验的实验设计的相关内容来自大亚湾中微子实验的技术设计书 [55]。

2.2 实验设计

大亚湾中微子实验的设计要求测量 $\sin^2(2\theta_{13})$ 的精度达到 1%, 比 CHOOZ 实验给出的 0.15 [44] 要高一个量级。这就要求优化探测器, 压低本底, 控制系统误差。具体表现在如下几个方面 [55]:

1. 探测器选址上兼顾基线优化与岩石覆盖厚度。由于宇宙线、天然放射性等对低能量、低事例率的中微子实验造成的本底非常复杂, 对本底的估计一直缺乏有效的手段。足够的岩石覆盖大大地减少了宇宙线本底的影响, 提高了实验的精度与可靠程度。目前国际上关注的其它可能用来做反应堆中微子实验的核电厂附近都没有足够的岩石覆盖。这是大亚湾的一个重要的优势。
2. 利用远处和近处两个探测器做相对测量。除了在最优化基线处放置远端探测器外, 在离反应堆较近的地方放置完全相同的近探测器, 用以测量反应堆近端和远端不同距离处反中微子的相对存活几率(振荡几率)。探测器需要设计成全同的, 以抵消探测效率、有效体积和能量测量等方面的系统误差。实验布局如图 2.2。
3. 探测器采用三层结构。最里层是掺钆的液体闪烁体(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得很好, 这样不需要用事例顶点来做判选。如果用拟合而来的事例顶点来判选事例, 判选效率难以精确估计, CHOOZ 与 KamLAND 的经验证明这将带来较大的误差。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。
4. 探测器设计成可移动的。在将来有可能的条件下, 可以将远近探测器进行交换(swap), 利用探测器之间的相对刻度, 可以有效地消除由探测器的微小差异



图 2.2: 大亚湾反应堆中微子实验的实验点设置和反应堆位置示意图。图中标示出了三处反应堆的位置，两个近点各两个柱形探测器，远点有四个圆柱形探测器，八个探测器完全等同。三个实验点由隧道相连（图中粗黑线）。

产生的误差，并有利于本底的精确减除。

5. 使用足够的防护降低本底。使用阻性板（RPC）和水契仑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。由高能物理所自主研发的阻性板探测器在新一代的北京谱仪 BESIII 上得到大量使用，性能可靠，成本较低，可以在大亚湾实验中大面积使用。
6. 采用多模块探测器。在每个实验室中采用多个独立测量的探测器模块使探测器的非关联系统误差统计地降低，同时同一实验室的模块之间可以相互验证，及早发现问题，提高实验的可靠性。

选址优化的原则是，在覆盖层足够的条件下，近点尽量接近反应堆，而远点接近 $\sin^2(2\theta_{13})$ 振荡极大值处，大亚湾中微子实验涉及到三个反应堆群，三个实验点的最佳位置设置是实验成功达到预期测量精度的必需，实验最终选择了图 2.2 上显示的三个实验点。大亚湾近点探测器的最优化位置距离大亚湾两个反应堆中心 363 米，此处的山体厚度约为 98 米。岭澳近点探测器的最优化位置距离岭澳两个反应堆中心 481 米，距离岭澳二期两个反应堆中心 526 米，此处的山体厚度约为 112 米。远

点探测器距离大亚湾两个反应堆中心 1905 米，距离岭澳及岭澳二期四个反应堆中心 1535 米，此处的山体厚度约为 350 米。

2.2.1 探测器设计

反应堆中微子实验探测器由反中微子探测器和 μ 子探测器组成。图 2.3 是大亚

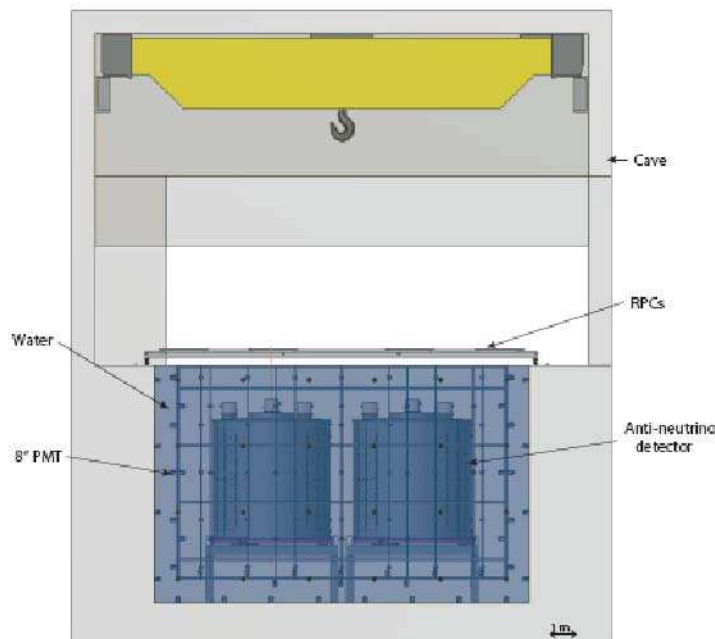


图 2.3: 反中微子实验厅整体结构示意图

湾中微子实验大厅横切面图。两个圆柱形结构的反中微子探测器也叫中心探测器，靠近水池的中心，近点为 2 个探测器模块，远点为 4 个探测器模块，中心探测器外层是 2.5 米的水防护层兼水契仑柯夫 μ 子探测器，水池正上方是 RPC μ 子探测器，大厅顶部有起吊装置，用于探测器的安装和移动。

2.2.2 中心探测器

远近点 8 个反中微子探测器模块（AD，Anti-neutrino Detector），每个直径和高都是 5 m 的不锈钢罐，如图 2.4 所示。

AD 内部共分为三层，由内到外依次是：掺钆液闪层（GdLS）、普通液闪层（LS）、矿物油层（MO）。这三部分被嵌套的直径和高都为 3 m、4 m 的两有机玻璃罐分开。收集信号的光电倍增管（PMT）整齐排放在矿物油层中，每个 AD 中有 192 个 PMTs，即上下 8 圈，每圈 24 个，光阴极有效覆盖率达 12%。矿物油层中紧贴 4 m 有机玻璃罐上下表面的是反射板，反射光信号，增加收集效率。在上下两端贴

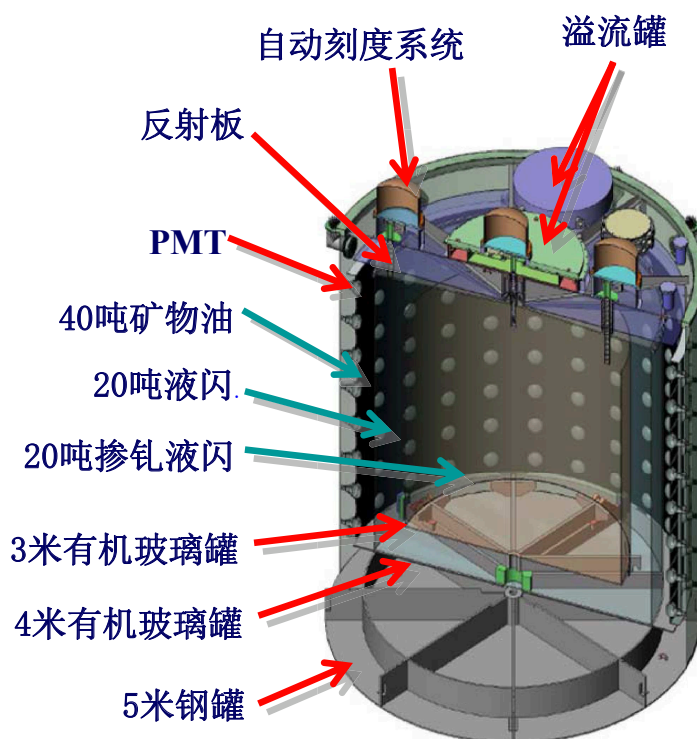


图 2.4: 反中微子探测器模块结构示意图。中微子探测器模块共分为三层结构, 由内到外分别是掺钆液闪层、普通液闪层、矿物油层。

反射膜而不放 PMT 可以节省大量的资金, 还可以提高能量精度, 减小能量判选带来的误差。

3 m 罐中的 20 吨掺钆液闪, 是探测中微子的有效靶质量, 钆浓度为 0.1%。含钆的液闪比普通液闪有以下两个好处:

1. 根据 CHOOZ 等其它实验的经验, 使用 0.1% 的掺钆液闪可使中子俘获时间常数由不含钆液闪 (普通液闪) 的 $210 \mu\text{s}$ 减少到 $28 \mu\text{s}$, 这样大大缩短了中微子两个事例的时间间隔, 有利于减少本底和提高中子俘获效率。

2. 钆俘获中子, 将放出 3-4 个总能量为 8 MeV 的 γ 光子, 这个能量远高于诸如天然放射性本底等本底信号的能量, 这样可以大大减少本底的事例率, 增加信噪比。

20 吨普通液闪层的作用是辅助收集掺钆液闪层中中子俘获发出光子的能量, 保证由内有机玻璃罐定义的掺钆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 (fiducial volume), 中微子靶质量造成的系统误差只决定于质量测量的精度。

40 吨的矿物油层, 矿物油的作用是屏蔽由于光电倍增管玻璃或者其它组成材料以及不锈钢外罐中可能的天然放射性本底。

图中还可以看出在顶部有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，溢流罐为防止温度变化而引起探测器内液闪溢出的装置。

掺钐液闪探测中微子信号的反应方程式为 2.1（图 2.5）：

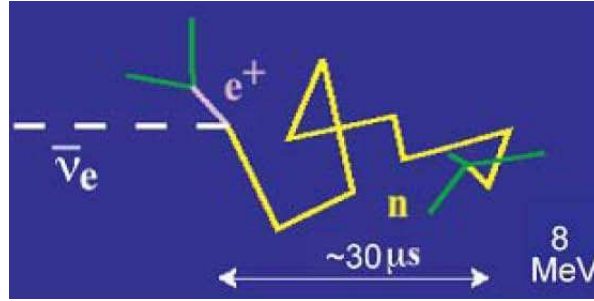
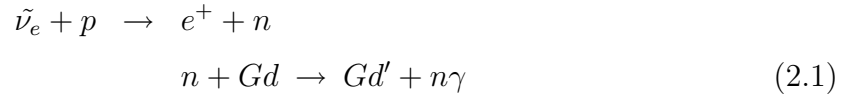


图 2.5: 中微子信号产生示意图

反电子中微子被质子俘获后，放出一个正电子和一个中子。正电子在液闪中沉积能量并发生湮灭，放出一对 511 KeV 的 γ 光子，这个过程极快，时间标度为 10 ns，由反应堆中微子能谱推导出来的正电子在探测器中的能量响应是 1-8 MeV；中子在探测器中经过一系列的散射过程之后，慢化为热中子，最终被钆核俘获，放出平均 3-4 个 γ 光子，总能量约为 8 MeV，时间标度为几十微秒，跟掺钐的浓度有关系。前面的正电子湮灭和后面的中子被 Gd 俘获，使得中微子信号具有前后的关联性。大亚湾实验就是寻找这种前后关联的特征信号实现对中微子的探测。

2.2.3 反符合探测器

对反应堆中微子这种低能低事例率的实验来说，想要达到较高的精度，必须将实验本底压低到相应的精度，所以这种实验应该在较深的地下或者有较厚的山体覆盖，但是这不能完全消除本底，实验厅仍会有很多的宇宙线（主要是 μ 子）本底，并加上天然放射性本底，这都会形成假中微子信号。

一般在中心探测器外面要加屏蔽层来屏蔽天然放射性本底和宇宙线与周围的岩石作用产生的散裂中子等。因为屏蔽层不能完全屏蔽本底，经过屏蔽层后，跟中微子事例来比，仍有大量的本底，所以还需要增加反符合探测器，来标记宇宙线 μ 子本底，通过时间窗口的反符合来去掉本底。

2.2.3.1 反符合探测器的选型

关于 μ 子的探测器，在作者谢一冈的书 [59] 第二篇粒子探测器中有详细的阐述，谢宇广的论文 [60] 第三章（3.2节），对各种 μ 子探测器，进行了简单总结。使用液体探测主要是用水或者液闪的形式，固体和气体探测器则有多种，国际上不同的实验根据自己的需求进行了不同的选择。

针对反应堆的中微子实验，之前的有 Palo Verde、CHOOZ 和 KamLAND 等，现在精确测量 θ_{13} 的反应堆实验包括了和大亚湾存在竞争关系的法国的 Double ChOOZ 和韩国的 RENO，反符合探测器设计见表 2.1。

实验	距离(m)	覆盖(mwe)	反符合探测器
Palo Verde	800	32	液闪
CHOOZ	1000	300	80cm厚液闪
KamLAND	180,000	2700	超纯水
DayaBay	1905/481/363	910/291/255	2.5m厚超纯水 + RPC
Double CHOOZ	1050/400	300/115	0.5m厚液闪 + 塑料闪烁体
RENO	1380/292	450/110(m)	1.5m厚超纯水

表 2.1: 几个反应堆中微子实验的反符合探测器的设计

对比这些实验可以看出以前实验的反符合探测器一般选用单一的液闪或者水即既作为屏蔽体又作为契伦科夫探测器来标记宇宙线 μ 子。Palo Verde 实验和 CHOOZ 实验都使用液闪来标记 μ 子；KamLAND 实验，探测器最大，山体覆盖最厚， μ 子计数率非常的低，使用了衰减长度较长的水契伦科夫作为反符合系统。大亚湾实验比 Palo Verde 和 CHOOZ 实验的山体覆盖都要厚，宇宙线本底比他们要低几个量级，但是大亚湾实验的设计为了达到测量精度在世界上最好，只有地理位置的优势也不行，还要在探测器的各个方面进行优化，在反符合探测器方面，采用了 2.5 m 厚的超纯水作为屏蔽体，它能将 1-2 MeV 的 γ 光子压低6个量级，可将岩石中子本底压低二十几倍 [62]，这比同时竞争的其他两个实验的屏蔽体都要厚；超纯水同时可以用来探测 μ 子。

大亚湾对 μ 子的有效探测效率要求达到 $99.5\% \pm 0.25\%$ 以上。这么高的探测效率，如果只使用一种反符合探测器风险太大，需要增加另外一个独立的反符合探测器。这样反符合探测器就具有了一定的冗余度，如果一个探测器出现效率的降低，另一个探测器也能及时给予补充。

因为大亚湾实验面积比较大，光三个实验点的水池上表面积就达到 672 m^2 ，所以最外层的反符合探测器需要造价低廉，易于大面积制造。固体探测器像闪烁体探

测器和半导体探测器都由于造价太高, 而不被选用。在气体探测器方面, 考虑大亚湾对宇宙线 μ 子的高探测效率, 低位置分辨的要求及成本, RPC 探测器首当其选。基于实验工程的造价和 RPC 本身的防水技术问题, RPC 探测器包围在水池四周或放到水中都不太可行, 最后我们选择只覆盖在水池上方。RPC 覆盖在上方能够探测大约 70% 的穿过水池的 μ 子。

大亚湾中微子实验的反符合系统使用 RPC 作为第二反符合探测器不仅能够实现反符合系统的效率目标, 还具有如下优势和创新:

1. 测量产生岩石中子本底的 μ 子。为了增加其对产生岩石中子的 μ 子的探测能力, 在水池的四周边上向外延伸 1 米, 即覆盖边缘的 1 m 岩石。根据模拟 [61], 当 RPC 覆盖周围 1 m 岩石时候, RPC 对岩石中子的探测能力达到 40%, 这是水池所不能具有的能力。
2. 测量水池边角的 μ 子。在水池边角上, 穿过水的 μ 子径迹比较短不容易被探测到, 在一定程度上 RPC 可以标志这些 μ 子。
3. 双探测器独立测量本底可以进行相互 check。如果只有水池的单一测量, 数据只能和模拟对比, 而现在在模拟里宇宙线散裂 (spallation) 产生各个产物的反应截面还不是太清楚, 有了 RPC 探测器, 我们可以比较不同的探测器的测量数据, 相互验证, 及早的发现问题, 提高可靠性。
4. 更好的 μ 子顶点分辨。RPC 测量 μ 子的位置可直接由数据得到, 不依赖于任何算法。大亚湾 RPC 的读出条宽度为 26 cm, 采用 X, Y 二维读出, 每个方向的分辨约为 7.5 cm, 而水池重建达不到这个精确。所以 RPC 不仅可以检验水池顶点重建的好坏, 还能联合水池提高重建的精度, 为本底的分析做贡献。
5. RPC 探测器将是第一次使用到地下反应堆中微子实验上。

2.2.3.2 反符合探测器的介绍

• 水契伦科夫探测器

图 2.6 显示的是反符合探测器示意图。反电子中微子探测器模块浸没在水池中。水池被 Tyvek 纸分隔成内外两层水契伦科夫探测器, 我们叫内水池和外水池。内外水池的侧面和底部都安装有 PMT。PMT 和 Tyvek 由不锈钢支撑架支撑。内水池边缘到 AD 边缘的最短距离为 1.5 m, 外水池厚度为 1 m。远点水池的长宽高规格为 16m $\times$ 16m $\times$ 10m, 两个近点一样, 规格为 16m $\times$ 10m $\times$ 10m, 为了利于水循环, 去掉了水池四个角, 水池变为八角形, 同时能够保证水池边缘距离 AD 最短距离仍为 2.5 m。大亚湾要求水池内光的衰减长度为 30 米, 需要水池 5 天循环一个体积。

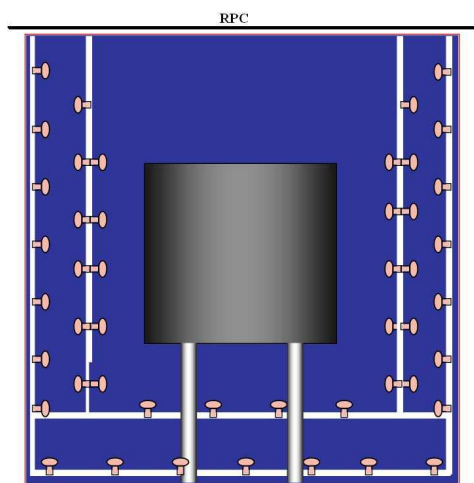


图 2.6: 探测器反符合系统近点示意图。水池子中放置反电子中微子探测器模块，两层水契仑柯夫探测器，上层是 RPC 探测器。这三个探测器作为宇宙线 μ 子的反符合探测器。

• RPC 探测器

RPC 探测器覆盖水池的上方，在图 2.6 中有显示。图 2.7 是 RPC 探测器模块化后具体的摆放方式。

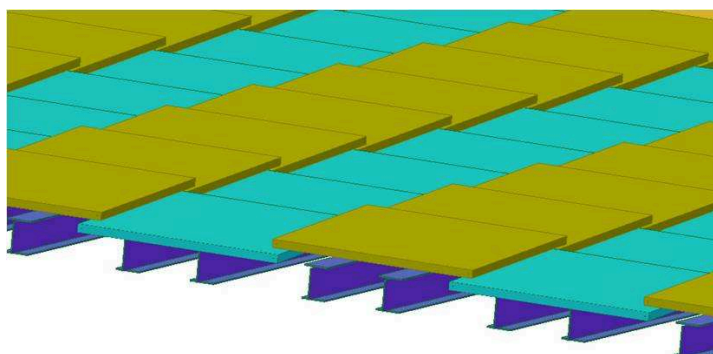


图 2.7: RPC 模块摆放结构示意图。

RPC 探测器覆盖在水池上方大约 75 cm 处，设计的面积比水池长宽各大 1 m，所以远点的面积为 $18 \times 18 \text{ m}^2$ ，两个近点面积一样，为 $18 \times 12 \text{ m}^2$ 。远点成 9×9 的模块阵列，近点成 9×6 的阵列。每个模块的规格是 $2.2 \text{ m} \times 2.17 \text{ m} \times 8 \text{ cm}$ 。模块间按照图 2.7 重叠放置，保证模块水平间距为 2 m。气体灵敏区重叠为 8 cm，模拟可知这种情况下 RPC 系统对 μ 子的探测效率大于 96%。模块内部设计成 4 层的 RPC 裸室来进行多重符合，提高效率，压低噪音。对于详细的设计，参看下一章。

两层水契仑科夫探测器与 RPC 探测器组合，这样设计突出的优势在于，在中心探测器周围的任何一处，都有两个独立的反符合系统，可分别对 μ 子进行独立探

测，这样可以更可靠的保证对 μ 子的探测。同时，探测器上面还有不同于水池反符合原理的 RPC 探测器，这样可以做到不同独立反符合系统相互验证。

2.3 大亚湾实验本底误差和预期目标

利用反应堆测量 $\sin^2(2\theta_{13})$ 是一个非常精密的实验，实验的质量直接取决于本底和系统误差的控制。大亚湾实验从选点，探测器设计等方面进行优化，以降低实验误差。表 2.2 列出了大亚湾中微子实验对事例率和本底的要求。

	近点	岭澳点	远点
基线长度	363m	距离岭澳堆481m 距岭澳-II堆526m	距大亚湾堆1985m 距岭澳堆1615m
岩石覆盖(m)	98	112	350
天然放射性(Hz)	<50	<50	<50
μ 子计数率(Hz)	36	22	1.2
反中微子事例数(个/天)	930	760	90
偶然符合本底/中微子事例(%)	<0.2	<0.2	<0.1
快中子本底/中微子事例(%)	0.1	0.1	0.1
^8He 和 ^9Li 本底/中微子事例(%)	0.3	0.2	0.2

表 2.2: 各实验点的中微子探测器模块的事例数和噪音比率

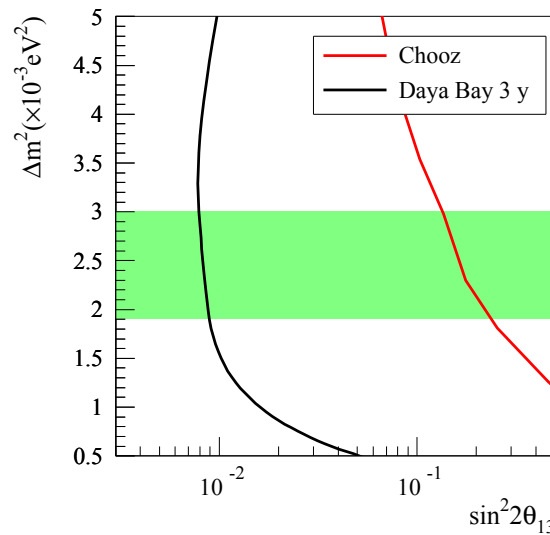


图 2.8: 大亚湾实验取数 3 年所能达到的在 90% 置信区间的灵敏度

图 2.8 是大亚湾中微子实验运行三年所能达到的预期灵敏度 (sensitivity)。这个图考虑了以上提到的各种本底、误差统计和系统误差后得到的预期结果。图中实黑线 (最左侧) 是大亚湾最终的预期灵敏度曲线。右侧曲线则是目前 CHOOZ 实验给出的最好结果的上限。带状 (绿色) 区域标出了由其它类型中微子实验确定的置信度为 90% 的 Δm^2 区域, 中心值为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 。大亚湾中微子的实验目标是在带状区域内, $\sin^2(2\theta_{13})$ 的灵敏度达到 0.01。

第 3 章 大亚湾 RPC 探测器的制作

在阻性板室（RPC）探测器发明出来的这 30 年里，其性能不断被改进，并运用于许多粒子物理或天体物理实验中。大亚湾中微子实验使用的阻性板室为国内自主研发，并借鉴北京谱仪 BESIII 的经验设计制造的 [56–58]。而且，根据自己实验的特点，将大亚湾 RPC 探测器设计为 4 层 RPC 重叠进行测量的模块化（RPC 模块）地毯式阵列。探测器的设计和制造是探测器的关键。本章将简要介绍 RPC 裸室的制作，重点介绍 RPC 探测器模块的设计和制作。

3.1 RPC 探测器介绍

RPC（Resistive Plate Chamber）是 19 世纪 80 年代初由 R. Santonico 等人在丝室的基础上开发出来的一种气体探测器 [73]。自 RPC 发明以来，已经应用在许多物理实验中，像国外的 BaBar [63]、BELLE [64]、OPERA [65]、LHC 里的 CMS 和 ATLAS 实验 [66–68]，在中国的北京谱仪 BESIII 上也有大面积的使用 [58]，进行宇宙线观测的羊八井实验站使用 RPC 的面积达到 6700 m^2 [69–71]，也是第一次将 RPC 大面积应用于宇宙线的观测实验中。

RPC 裸室是由两块高阻材料做成的平行板夹叠几毫米的气隙构成。高阻材料外面敷以导电石墨层，以便加高压和接地。石墨层外面覆盖麦拉膜（Mylar），用来绝缘。最外面有金属感应条，可以实现 X, Y 方向读出。高阻材料一般使用玻璃（易碎）或者酚醛树脂板，电阻率约 $10^{10} \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ ，并在内表面涂油，来降低噪音，提高性能。气隙一般是 2 mm 厚度，通入工作气体。工作气体一般由氩气（Ar）和起淬灭作用的气体（丁烷）混合而成。图 3.1 是 RPC 探测器的一般结构示意图。

- RPC 工作的基本原理

RPC 工作的基本原理是建立在粒子与介质碰撞和离子在气体中运动的机制之上 [59]，跟其他的气体探测器工作原理类似。当带电粒子穿过 RPC 的气隙层时，与气体分子中的轨道电子发生库仑相互作用，使气体分子获得能量从而激发或电离。带电粒子则因此损失能量，称为电离能损。由于高压电场的存在，原初电离中的部

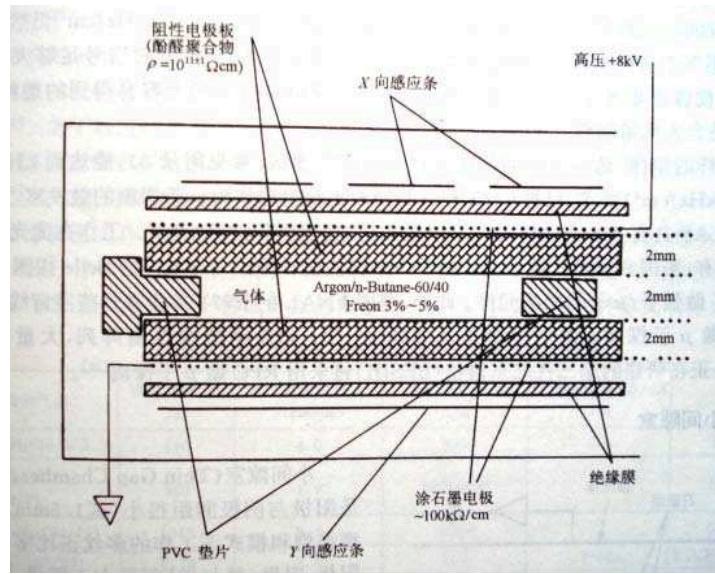


图 3.1: RPC 结构示意图 [59]。

分电子可能在碰撞过程中获得高于电离电位的能量，从而进一步引起其它气体分子的电离，称为次级电离。当电场强度达到 kV/cm 以上时，电子在碰撞过程中获得足够的能量产生各种激发和电离。此过程不断发展，出现气体探测器中重要的雪崩倍增过程。

雪崩进一步发展就会形成流光过程，但形成流光需要满足一些基本的条件。

- 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和外电场强度相比拟或者略小时，就达到了满足次级雪崩的 Meek 条件：

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

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。但随着流光的发展， r 将增大，从而使 E_r 变小，流光得到抑制。

- 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：

$$\frac{4}{3} K^2 r \alpha f e^{\alpha \delta} = 1 \quad (3.2)$$

式中 $K = (\Omega/4\pi) \exp(-\mu x)$ ， Ω 为“液滴”偶极子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 Townsend 系数， δ 为雪崩头部到阳极的距离。如果光

子自由程很大, 沿径向的流光将不能持续。如果需要使用流光模式, 则要选择猝灭性强的气体或加大猝灭气体成分以使光子的自由程减小。

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猝灭性气体如异丁烷、氟化物等。

- RPC 探测器的特点

RPC 探测器的特点表现如下:

1) 在雪崩模式下时具有较高的计数能力, 可以达到上千赫兹, 所以工作在雪崩模式下 RPC 被 CMS 和 ATLAS 选用作为 μ 子探测器。不过雪崩模式下信号幅度较小, 需要前端电子学放大。而在流光模式下时, 具有较大的信号幅度, 可以直接读出, 无需电子学放大不过恢复较慢, 适合低计数率 ($<100 \text{ Hz/cm}^2$) 的条件下工作; 时间分辨 $\leq 1.5 \text{ ns}$; 探测效率可达 98%。

2) RPC 的探测面积可以很大。单个 RPC 室的面积可以达到几平方米。这个特点使 RPC 在现在探测器规模越来越大的高能物理实验中逐渐发挥重要作用。在中国, 西藏羊八井宇宙射线观测站有大面积的 RPC 观测阵列, 北京谱仪的端盖和桶部也有几百平方米的 RPC 室; 在国外许多实验也都选用 RPC 作为强子/ μ 子的探测元件。

3) RPC 造价低廉。使用的阻性板材料等容易买到, 而且制作过程与工艺相对简单, 比较容易进行批量生产和组装。这也是它比其他探测器受青睐的地方, 也是它快速在世界各大实验应用的原因。

4) RPC 信号的读出灵活, 可以将读出条设计成不同的几何形状。RPC 读出条一般是在金属覆板上使用刻或者蚀工艺, 像制作电路一样进行刻蚀。不过由于蚀的成本较高, 一般还是使用刻来达到自己设计的形状。

大亚湾实验在山体下面, μ 子通量最大 (近点) 只有 10^{-4} Hz/cm^2 , 远远低于 RPC 在流光模式下所能承载的计数能力, 所以完全可以利用流光模式使探测器达到高探测效率。由于信号读出灵活的特点, 可以根据要求的位置分辨和电子学道数设计合适的读出条宽度。因为造价低, 还可以多层探测器重叠放置, 压低噪音, 并实现二维读出。所以 RPC 完全适合用于大亚湾中微子实验。

3.2 大亚湾 RPC 探测器的设计

大亚湾 RPC 探测器是由多个 RPC 模块横向叠放组成的几百平方米的地毯式阵列。每个模块由 4 层 RPC 上下重叠组成, 长宽约为 2 米, 高约 8 厘米。

大亚湾 RPC 裸室是在 BESIII 的基础上发展而来 [56–58], 其设计在论文 [72] 中有所阐述, 这里不再细述。

大亚湾使用 RPC 模块直接覆盖在水池上方, 模块的各方面的性能设计, 将直接影响到将来 RPC 系统对 μ 子的测量, 以及 RPC 系统各方面的运行等。模块单元的大小、模块单元内部的设计等内容将是本节研究和讨论的问题。

3.2.1 模块单元大小和层数的设计

根据裸室的测量结果, 裸室的平均效率为 96.05% [75]。只看这个结果, 使用一层 RPC 裸室好像也能满足 RPC 系统效率达到 90-95% 的设计要求 [30]。不过 RPC 探测器噪音大, 典型值为 1 KHz/m², 远远大于大亚湾近点的 μ 子计数率 (1.27 Hz/m²) 和远点的 μ 子计数率 (0.048 Hz/m²), μ 子信号将彻底淹没在噪音之中, 并且反符合 (veto) 过后, 将没有测量中微子的活时间。所以必须考虑多层符合来降低噪音, 即物理实验中经常使用的符合测量的方法。这就需要考虑模块的层数和大小的设计*

• 模块的层数设计

首先考虑的是层数的问题。通过多层符合, 可以提高效率和信噪比, 但是考虑到成本问题, 层数也不能过多。其次是考虑模块的大小, 越大则噪音越多; 越小则噪音越低, 但是重叠起来比较浪费, 电子学上又会增加成本。

对于效率的计算我们可以用公式 3.3 来得到。

$$\epsilon_{m/n} = \sum_{i=m}^n C_n^i f^i (1-f)^{n-i}. \quad (3.3)$$

其中 $C_4^i = 4!/(i!(4-i)!)$ 是二项分布系数, f 为单层 RPC 的效率, n 为 RPC 的重叠层数, m 为符合测量选择层数, $\epsilon_{m/n}$ 则表示 n 选 m 的效率, 这种选择模式简称为 m/n 触发模式。假设每层 RPC 的效率为 95%, 则在不同层数, 不同选择模式下模块的总效率可以见表 3.1。

关于噪音的计算我们根据偶然符合的计算公式 [76], 可得总的偶然符合计数率为:

$$R = \frac{1}{\tau} \sum_{i=m}^n i C_n^i (kA\tau)^i (1-kA\tau)^{n-i} \quad (3.4)$$

其中, τ 为符合时间窗口, m 为符合数, n 为总层数, k 为 RPC 的单计数率, A 为模块面积。k 选取典型值 1 kHz/m², τ 取 100 ns, 此为 RPC 信号的平均宽度。A 取 4 m², 即模块的灵敏区为 2 m×2 m。带入计算会得到不同层数和符合触发模式下, RPC 的噪音水平, 见表 3.1。其中, μ 子有效触发率为真实的 μ 子信号计数率在近点采用 1.27 Hz/m², 远点采用 0.048 Hz/m² [77] 时, μ 子真实触发信号占总信号

*最初的计算由张清民完成。

的比率。死时间占用百分比是按照触发的噪音跟 μ 子信号一样开 $200 \mu\text{s}$ 的 veto 时间窗口得到。

触发模式	2/2	2/3	3/3	2/4	3/4	4/4
效率(%)	90.25	99.27	85.74	99.95	98.60	81.45
噪音(Hz/m^2)	0.80	2.40	4.8×10^{-4}	4.80	0.0019	2.56×10^{-7}
近点 μ 子有效触发率(%)	61.35	34.61	99.96	20.93	99.85	100
远点 μ 子有效触发率(%)	5.66	1.96	99.00	0.99	96.15	100
近点死时间(%)	3.46	10.37	2.1×10^{-3}	20.73	0.0083	1.11×10^{-6}
远点死时间(%)	5.18	15.55	3.1×10^{-3}	31.09	0.012	1.66×10^{-6}

表 3.1: 不同触发模式下的 RPC 噪音水平、 μ 子有效触发率和由噪音引起的死时间

可以看出, 只有在 2/2、2/3、2/4、3/4 触发模式的时候, 模块的效率才能高于 90%。噪音低, μ 子有效触发率高的是使用 3/3、3/4、4/4 触发模式。而对大亚湾中微子的取数活时间影响较小的是 3/3、3/4、4/4 触发模式。鉴于此, 应该采用 3/4 触发模式。在这种模式下效率高 (98.6%), 噪音低、 μ 子有效触发率高, 因噪声引起的死时间可以忽略不计。所以模块采用 4 选 3 的触发模式比较好, 即采用四层 RPC 裸室叠放的设计方案。

选用四层 RPC 裸室叠放的另一个原因是具有较高的系统冗余度。例如, 运行时当某一层坏掉, 而其他三层还能正常工作时, 模块还可以选择 2/3、3/3 触发模式。在 2/3 触发模式下效率高, 甚至超过 3/4 触发模式下的效率, 但是这种模式下, 噪音也较高, 带来的死时间较大, 所以模块全用 2/3 工作模式自然不行。但 RPC 探测器的多模块设计使得一个模块工作在 2/3 下是可以的, 例如大亚湾近点使用 54 个模块, 假设一个模块坏掉一层, 则此模块选用 2/3 工作模式后, 效率还有所提高, 只是噪音增加, 使总的死时间增加了 $10.37/54 \approx 0.2\%$, 相对于活时间的要求 (近点 75%, 远点 99% [78]) 是可以接受的。如果使用 3/3 触发模式, 效率虽然降低了, 但是噪音、 μ 子有效触发率、死时间反而比 3/4 触发模式下的好。如果超过一定数量的模块坏掉一层, 而且水池效率较高 (98.8% 以上) 也可以考虑使用 3/3 触发模式。

如果一个模块的某两层同时坏掉, 只能使用 2/2 触发模式。这种模式下, 效率达到 90.25%, 噪音引起的死时间增加的也不多, 所以一个模块的两层坏掉也不必马上停止取数更换模块。所以一个模块的某一层或者两层坏掉, 可以继续取数等到合适的时间, 进行大修的时候再修。

当然如果 3 层以上坏掉, 根据电子学设计, 模块将不会有触发信号, RPC 探测器的整体探测效率会降低约 2%, 从局部看, 就像水池上方有个黑洞, 所以应该及

时更换模块。

当然模块组装的层数越多，能够符合的层数越多，噪音就会越低，系统冗余度越高。通过探测器性能和成本上的综合考虑，设计成4层最合适。

• 模块的大小设计

对于大小的设计，可以固定层数为4，研究噪声和效率随模块面积的变化。在效率方面，如果不考虑模块边缘死区带来的影响，模块的效率跟大小无关，所以下面只研究噪音的变化。

通过公式 3.4 计算，固定层数为4，其他输入跟上一节一样。因为大亚湾两近厅 RPC 覆盖面积各为 $12 \times 18 \text{m}^2$ ，远厅覆盖 $18 \times 18 \text{m}^2$ 。为使生产和安装简单易行，最好使用统一规格的模块。所以 RPC 模块可设计的长宽规格是2、3、6米的组合或者是其中一个和9米的组合，所以共9种组合方式。表 3.2 给出在近点实验厅 2/4 和 3/4 触发模式下在不同面积（9种中的几种）下噪音的事例率。

模块面积(m^2)	2×2	3×3	3×6	6×6	6×9
2/4噪音触发率(Hz/m^2)	4.80	10.79	21.56	43.04	64.45
3/4噪音触发率(Hz/m^2)	0.0019	0.0097	0.039	0.16	0.35
2/4 μ 子有效触发率(%)	20.93	10.53	5.56	2.87	1.93
3/4 μ 子有效触发率(%)	99.85	99.24	97.03	89.11	78.46

表 3.2: 不同模块面积下的 RPC 噪音水平和近厅 μ 子有效触发率

μ 有效触发率只给出了近厅的结果，远厅因 μ 事例率减低而有效触发率随之减低。不过在模块面积变化过程中，变化趋势是一样的。通过表格可以看出，当模块的面积减小的时候，模块的噪音水平在降低，同时 μ 子有效触发率在升高。所以模块规格的选取越小，2/4，3/4 噪音触发率越低，相应的 μ 子有效触发率越高。

模块太小不但电子学道数要求增加，而且模块与模块之间摆放重叠的总面积增加，增加了材料的浪费和重叠带来的死区；模块太大不但噪音升高也会给运输和装配等造成困难。经过多方面考虑，选取了两米长宽规格的模块。

3.2.2 模块单元内部的设计研究

上一节研究模块的大小和层数的时候只是进行了简单估算，使之能够满足大亚湾的物理要求。模块在执行探测任务时是一个有机整体，不仅包括4层 RPC，还包括 RPC 的摆放设计、读出方面的设计、气体连接、模块内部空间的利用、支撑结构、铝盒等各个方面的设计。单个模块是整个 RPC 系统的基本单元，设计的好坏，

也将影响 RPC 系统的探测效率、性能、运行和维护等。

3.2.2.1 裸室的摆放

前面给出模块单元的长宽为 2 m 的概念，而实际上为了减小两模块单元间的死区，模块单元间需要重叠摆放，而且为了模块内部走线等空间的需要，模块单元最后设计成了 $2.17 \times 2.2 \text{ m}^2$ ，内部每层 RPC 大小为 $2.1 \times 2.1 \text{ m}^2$ 。实际上，阻性板板材的长宽为 $1.2 \times 2.4 \text{ m}^2$ ，裁剪过后面积会更小，所以模块单元 4 层 RPC 每层至少需要两个 RPC 室来拼接。

裸室四周有 1 cm 宽的密封条来确保裸室的气密性，工作时这片区域没有高压也没有气体通过， μ 子穿过时探测器是探测不到信号的，属于裸室的死区。每层 RPC 只能由两个裸室拼成，在拼接处会形成 2 cm 宽、2.1 m 长的死区。我们知道宇宙线中 μ 子垂直入射的最多，如果上下 4 层正对叠放，当垂直 μ 入射经过这片区域时，4 层裸室都感应不到信号，这个 μ 子就会丢掉。

可将四层的死区每层都错开一些，使 μ 子至少能穿过一层裸室的气体灵敏区（active/sensitive area），这样 μ 子丢失的几率会小些。基于这种想法可以将裸室生产不同的规格，上下层交错叠放，这样就会实现上面的想法。考虑到生产的复杂性，只生产两种规格的就够了，一块生产的大一些，另一块生产的小一些。图 3.2 是裸室在模块中四种不同的摆放方式。第一种（Type I）是前面讨论的容易丢失 μ 子的情况，即生产两种一样规格的 RPC 裸室， $1.05 \times 1.05 \text{ m}^2$ ，每个裸室都按照一个方向叠放，死区上下正好重叠。第二种（Type II）是生产两种不同宽度的裸室，在不同层错开叠放，这样 1、3 层死区上下正对，2、4 层死区上下正对，相邻层死区错开。第三种（Type III）仍是同样规格的两种裸室，但是 1、3 层死区方向和 2、4 死区方向垂直，相邻层死区方向远远分开。第四种（Type IV）是生产两种规格的裸室，每层的摆放方式都不同，使四层死区完全错开。

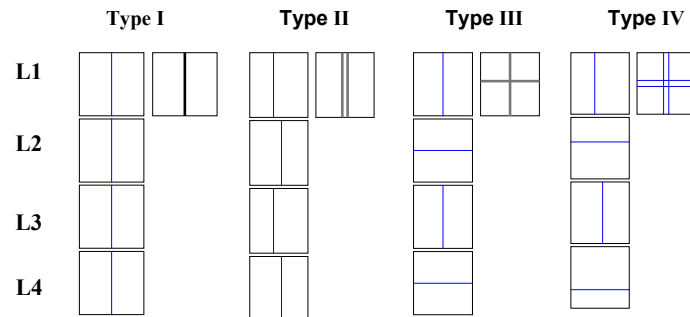


图 3.2: RPC 裸室在模块内部的 4 种不同摆放方式

通过模拟计算可以比较四种情况哪种情况更好，两种裸室生产多大比较好。假设裸室灵敏区域效率为 95%，定义 offset 变量（错位距离）是拼接死区中心与 RPC 中心的距离。图 3.3 是图 3.2 的后三种情况在不同的选择模式和 offset 距离下模块的效率的比较。图 3.3(a) 对应图 3.2 的 Type II；图 3.3(b) 对应图 3.2 的 Type III；图 3.3(c) 对应图 3.2 的 Type IV；而图 3.3(a) 中 offset = 0 时候，则对应图 3.2 的 Type I。

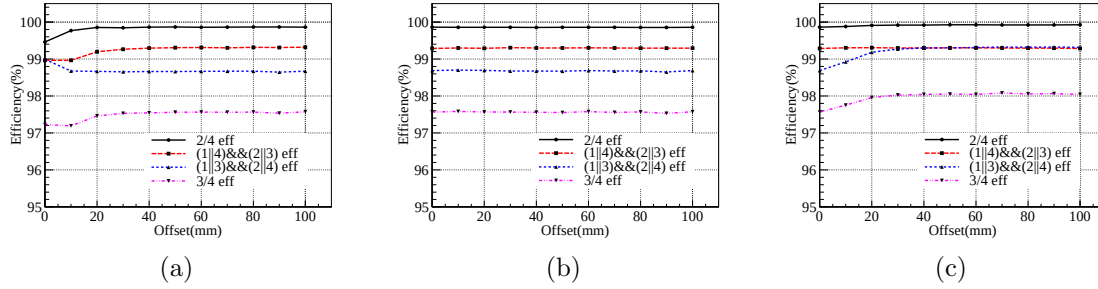


图 3.3: 模块内部裸室不同叠放方式对效率的影响

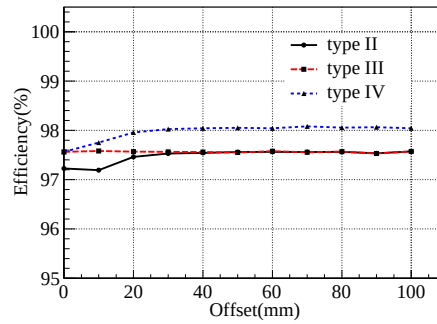


图 3.4: 不同叠放方式在 3/4 模式下的效率比较

对于图 3.3(a)，可以看出在 offset = 0 时即第一种摆放方式，模块 2/4 触发模式下的效率（2/4 效率）为 99.5%，3/4 效率为 97.2%，随着 offset 的距离增大，效率有所升高。这种叠放情况下，选取 offset 为 5 cm，已经足够，即生产一种宽为 $2.1/2 + 0.05 = 1.1$ m，一种宽为 $2.1/2 - 0.05 = 1$ m 的裸室就可以了。中间两条线是其他两种触发模式下，模块的效率。因为模块采用两层 X 方向，两层 Y 方向的二维读出，来确定 μ 子的击中（hit）位置，确定一个 μ 子的 hit，至少需要一个 X 和一个 Y，所以 (1|4)&(2|3) 表示读出条选取 1、4 为 X 读出，2、3 为 Y 读出时，确定一个 μ 子 hit 位置的效率，(1|3)&(2|4) 表示读出条选取 1、3 为 X 读出，2、4 为 Y 读出时，确定一个 μ 子 hit 位置的效率。这两种方式是属于 2/4 触发模式中的两种，将来大亚湾 RPC 在线取数采用 2/4 模式，所以也包括这两种特例。由此还可以看出如果模块采用 Type II 情况，读出条选取 1、4 为 X 方向读出，2、3 为 Y 向读出会比较好。

对于图 3.3(b), 在不同的 offset 下, 各自触发模式下的效率没有变化, 所以莫不如生产一种规格的裸室 $2.1/2 = 1.05 \text{ m}$, 即 offset = 0 时的情况, 模块的效率在 2/4 下为 99.9%, 3/4 下为 97.6%。虽然 Type I 在不同的 offset 下也都一样, 但是还是比 Type III 效率低一些。

对于图 3.3(c), 模块 2/4、3/4 效率在开始就随 offset 增加而增加, 2~3 个厘米后也都上坪, 所以这种摆放情况下, 选取 5 cm offset 就足够。

这四种类型的 3/4 模式放在一个图中显示为图 3.4, offset = 0 对应 Type I。可以看出同在 3/4 触发模式下, Type I 叠放类型效率最低, Type IV 效率最高。Type II 和 Type III 在 offset 大于 4 cm 后效率基本相等。这三种情况取 offset 为 5 cm 效率都能上坪。所以理论上第四种叠放类型比较好。

但是因为裸室两头都有高压和气嘴, 如果选取第四种类型, 模块的四周都会分布高压和气嘴对走线不利, 而且四周需要保护和牢固固定, 这给工程上模块装配带来麻烦。再一点是从高能所经过两千多公里运到大亚湾, 裸室之间最好不要有挤压, 模块躺着放置上下 RPC 裸室之间有挤压, 若立着, 第四种方式也会碰到上下层两个裸室挤压的情况。Type III 也会有类似的情况。而第二种叠放方式, 高压和气管只分布在模块的两侧, 处理起来比较容易。运输时采取模块按照裸室长度方向站立放置, 裸室间将没有重力的挤压, 风险系数会降低。所以模块装配选取了 Type II 的叠放方式, offset 选取了 5 cm, 即生产两种规格的裸室, 一种 $1.1 \times 2.1 \text{ m}^2$, 一种 $1.0 \times 2.1 \text{ m}^2$ 。Type II 型比 Type I 型效率提高了 0.4%。

3.2.2.2 信号的读出设计*

• 读出条宽度研究

RPC 的读出是靠读出条来感应信号的。提到读出条, 离不开长宽形状和匹配电阻的设计。设计的长宽是根据实验的需要综合考虑的。阻性板探测器一般使用大面积, 考虑节省电子学读出道数的需要, 在对时间分辨要求不是太高的情况下, 选用长读出条; 对空间位置分辨要求不高的情况下, 一般使用宽读出条。如果时间精度要求不高, 而位置分辨要求高, 一般使用二维读出, 像 OPERA 实验 [79] 就是使用的 8 m 长 2~3 cm 宽的读出条。

大亚湾实验 RPC 对 μ 子的探测效率要求高, 但是对时间和空间位置分辨要求不是太高, 所以可以考虑使用长读出条, 在大亚湾设计之初对长读出条进行了详细的研究 [80, 81], 但是通过模块大小的设计我们知道, 使用 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的模块, 这就决定了不能使用长读出条。和模块相匹配的 2 m 读出条是较好的选择, 而且使用 2 m 读出条在装配和运输模块方面也比较方便。

*此节部分工作是关梦云和张清民完成

在宽度上（图 3.5），相同匹配电阻下，读出条越宽，信号的幅度越小，宽度也越大。信号幅度小，效率就会降低，信号宽度大，偶然符合就会增加，所以读出条不能太宽。

大亚湾专门设计了“Z”形回旋读出条（图 3.6，实验研究使用的是 $25\text{ cm} \times 2\text{ m}$ ，最终设计为 $26\text{ cm} \times 2.1\text{ m}$ ），从信号的传输过程看，此读出条相当于 6 cm 宽 8 m 长的读出条，在相同阈值条件（ 30 mV ），匹配 $22\ \Omega$ 时，信号幅度 75 mV ，半宽为 27 ns ，比 $25\text{ cm} \times 2\text{ m}$ 读出条信号幅度大，宽度窄（图 3.5），跟 $6\text{ cm} \times 2\text{ m}$ 的结果一致，这样相当于达到信号窄，幅度大，在不同层进行二维度读出，节省了电子学道数。而 26 cm 宽的读出条位置分辨可达到 $26\text{ cm}/\sqrt{12} \sim 7.5\text{ cm}$ ，这比水池的 μ 子位置重建精度好很多，所以也可以帮助水池进行位置重建。

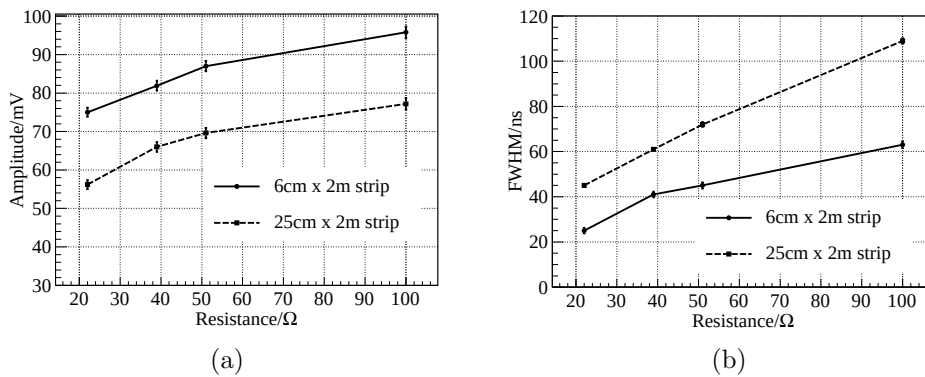


图 3.5: 不同匹配电阻对信号的影响

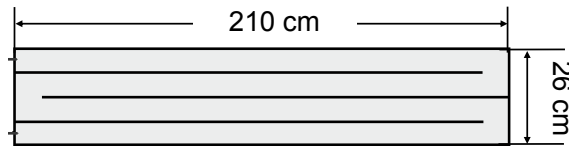


图 3.6: 回旋读出条

• 读出条匹配电阻的研究

从图 3.6 中还可以看出，匹配电阻对信号也有影响，匹配电阻越大，信号的幅度越大，同时宽度也越大。对于回旋条，对匹配电阻更是敏感，匹配不好就会形成反射（图 3.7），引起波形畸变，影响阻性板探测器的时间分辨率甚至探测效率。

文献 [85] 给出了读出条宽度和特性阻抗的关系式，可用于阻性板探测器读出条匹配阻抗的计算。实际操作中，还需要根据读出条的特点，进行匹配电阻的调节，使信号达到无反射，宽度窄，幅度大的最佳状态。

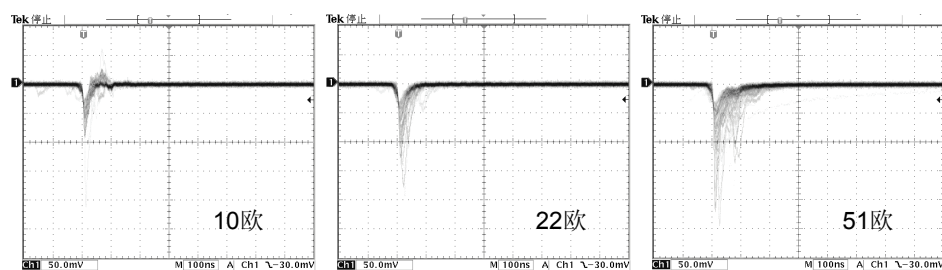


图 3.7: 回旋条下不同匹配电阻时的信号

大亚湾最终使用的电阻是双端匹配 $27\ \Omega$ (图 3.13)，读出条是 $26\text{ cm} \times 2.1\text{ m}$ 的回旋条，在不同层进行二维读出。

• RPC 模块的读出方式

RPC 裸室的噪音比较大，取数的时候若全部取进来，近点噪音引起的取数率将达到 216 KHz ，远点将达到 324 KHz 。电子学和数据获取系统工作将会饱和，支持不了这么大的取数率。所以得使用合适的符合方式去掉一部分噪音再取数。

前面讨论了采用 $3/4$ 触发模式最符合物理方面的要求，在线取数的时候也可以采用这种方式，可是当模块中一层不工作时候，在线取数将只能是 $3/3$ 触发模式，另一方面如果在线采用至少三层着火的触发，就丢掉了 2 层触发的逻辑，离线分析数据时候找不到 $2/3$ 和 $2/2$ 的触发模式，即丢掉了我们备用的物理信息。若取数的时候使用 $2/4$ 触发模式，噪音和 μ 子近点的取数率只有 3 kHz ，远点只有 4 KHz ，电子学取数的要求能满足，离线也可以找回 $3/4$ 的事例，物理信息能最大化保存。

RPC 取数使用在线 $2/4$ 的触发模式，而离线数据处理选择 $3/4$ 触发模式。

3.2.2.3 气路 and 高压

一个模块有 4 层 RPC，每层有两个裸室组成，每个裸室有一进一出两个气口。如果每块裸室单独供气一个模块就有 8 进 8 出，共 16 路气体。一个近厅就需要 $54 \times 16 = 864$ 路气体，远厅需要 $81 \times 16 = 1296$ 路气体，而且每路气体有电子监测的气泡速率的气泡瓶 (bubbler)，考虑降低成本的需要，可以在模块内将裸室适当串联，降低路数。

我们将每层的两个裸室串联，1、2 层的串联，3、4 层的串联，每个模块采取两进两出 (图 3.8)，气体系统路数降低了 8 倍，两个近厅每个需要 108 路，远厅需要 162 路，成本大大降低，而且工程上容易操作。模块内没有 8 块裸室全部串联是因为如果一路出现问题，整个模块将不能工作，模块所在的面积区域对 μ 子的探测效率突降为零。若采取两进两出，如果一路气坏掉，还剩一路气体可以工作，即还有

两层在工作，我们可以选取 2/2 的触发模式（表 3.1），对 μ 子的探测效率仍然可达 90% 以上，而且对 μ 子的探测至少还能探测到一路 X 和一路 Y， μ 子的位置分辨仍然可以达到 8 cm。在模块外面，每层留有一进一出，共 8 个口。如果是裸室的问题，在分析数据时候还可以发现到底是哪层坏掉，这样还可以及时将那一层短路掉，让剩下三层工作，所以还可以使用 3 层工作的触发选择模式，进一步提高探测器效率。

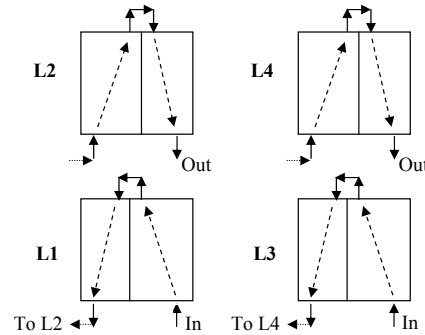


图 3.8: 模块内部气体的流通路线。L1、L2、L3、L4代表1、2、3、4层。

在高压方面，每块 RPC 裸室有一正一负两个高压，所以跟气体一样，每个模块有 8 路正、8 路负共 16 路高压，我们采取每层独立工作的模式，即每个模块的每层高压独立工作。如果一路高压坏掉，不影响另外的三层，这样仍可以在 3 层工作的触发模式下工作。一路正或负高压供应同层的两个裸室，这是在模块的外边的高压分配盒（RPCIs）里进行操作的，其实如果是裸室本身的问题，像裸室高压断路，则同层的另外一块模块仍能正常工作。

3.2.2.4 形变测试

铝材料价格贵且硬度没有钢的高，但是铝材料的优点是不会生锈。大亚湾中微子实验取数 3 年，运行 5 年。RPC 模块外壳如果使用钢材料，在南方的潮湿环境中可能要生锈。如果使用铝材料就要克服铝材料的形变，使之不会对探测器性能产生影响。

针对这个问题，就模块进行了一系列形变测试实验，验证和改进探测器设计。

实验前的准备：将 RPC 模块的空铝盒（宽 2.5 cm 矩形方管铝框 + 底层 1.5 mm 铝皮）放到模块斜支撑架（梁宽 1.2 m）上底部铝皮变形严重，于是用装饰胶将底层铝皮和 15 mm 蜂窝板粘结到一块，上面压重物，24 小时后再测。

实验设计（图 3.9）：在模块底部中心贴一个反射镜，使用固定不动的激光笔照到镜子上，镜子将光反射到竖直面板上。当模块中心下沉的时候，光路就会移动，

在面板上计算出变化的值。

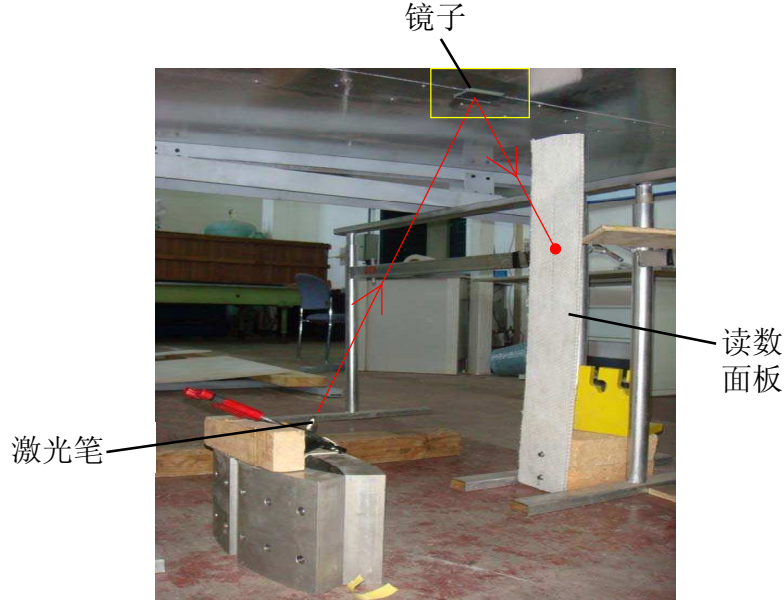


图 3.9: 模块形变测试实验

测试1: 空载上人测试。将模块的空盒（四周的铝框 + 底层 1.5 mm 铝皮 + 粘结的蜂窝板）放到斜支撑架上，用肉眼看不出形变，上人（~85 kg）站于中央，模块中心下移 15 mm。由梁弯曲法测量杨氏模量的公式 [82] 得到蜂窝板的杨氏模量为

$$E = \frac{mgl^3}{4\lambda\delta^3b} = \frac{850 \text{ N} \times 1.2^3 \text{ m}^3}{4 \times 15 \text{ mm} \times 1.5^3 \text{ cm}^3 \times 2.1 \text{ m}} \approx 345 \text{ GPa}$$

其中 E 为杨氏模量， m 是中间重物的质量， l 是两个支撑点的宽度， λ 是下垂距离， δ 是蜂窝板厚度， b 是被测物的宽度。可见蜂窝板的杨氏模量比钢的（190-210 GPa）还大，可以较好的起到支撑作用。蜂窝板密度比钢的小很多，使用起来比较轻便。人下去后大约 5 分钟复原，说明蜂窝板具有较好的刚性。

测试2: 模块形变在斜支撑台上，空载时基本没有形变，假设空载时形变为 0，大亚湾的模块探测器的主要部分四层裸室和阳光板装入铝盒组装好后，模块中心下移 6 mm（图 3.10）。

假设弯曲成圆形，通过几何方法可以求得此段弧对应圆的半径 R 约为 30 m，弧度 φ 约为 0.04。阻性板弯曲中心线长度不会变，而阻性板内表面（距中心线 1 mm）因弯曲导致的伸长率为：

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\varphi \times 1 \text{ mm}}{1.2 \text{ m}} \approx 3.3 \times 10^{-5} \quad (3.5)$$

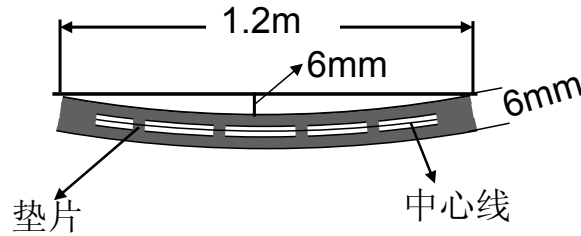


图 3.10: RPC 裸室形变示意图

而 RPC 裸室中间垫片紧贴阻性板的内表面，垫片接触面的伸长率也是这一数值。垫片的杨氏模量 E 约为 2 GPa [83]，面积 S 为 0.5 cm^2 ，作用在垫片表面的力为

$$F = E \frac{\Delta l}{l} S \approx 2 \text{ GPa} \times 3.3 \times 10^{-5} \times 0.5 \text{ cm}^2 \approx 3.4 \text{ N} \quad (3.6)$$

一般环氧胶在粘接 24 小时候后能承受的强度为 $28\text{-}34 \text{ kg/cm}^2$ [84]，垫片所能承受的最大力为

$$F_{\max} = 34 \text{ kg/cm}^2 \times 0.5 \text{ cm}^2 = 170 \text{ N} \gg 3.4 \text{ N}$$

所以模块现有的设计带来的形变不会给裸室的粘接垫片造成开扣，即不会对内部的裸室造成损坏。

测试3：模块上人测试

人重约 85 kg，站在中央，模块中心下降 $\sim 11.5 \text{ mm}$ 。人下去后仍旧发生形变 $\sim 1.8 \text{ mm}$ ，等待 10 多分钟，模块仍不能及时复原。虽然计算后模块形变产生的力仍不能将垫片开扣，但是形变不能恢复，可能对探测器其他构造造成影响，建议模块上最好不要上人，如果必须上人的时候。建议在模块上方垫一块硬板，将模块受力面积加大。

在此基础上，我们还进行了四角支撑的形变测试和吊具方面设计的测试。四角支撑会对模块带来较大的形变，建议不要四角支撑；吊耳方面的机械设计较好；边框铝方管具有良好的支撑性能，对 210 kg 的模块来说铝管基本没有形变。

3.2.3 单模块整体介绍

前面几节分别研究了模块的各个部分的设计概念，在设计的基础上也稍有修改，最后我们得到了具体的 RPC 探测器模块。下面进行模块单元的整体介绍。

大亚湾 RPC 模块外包装是一个铝盒子，大小 $2.17 \times 2.20 \text{ m}^2$ ，厚度是 8 cm，里面装有 4 层 RPC，3 层阳光板，1 层蜂窝板，4 层读出条，3 层地，和使读出条信号正常的隔离层等（图 3.11）。

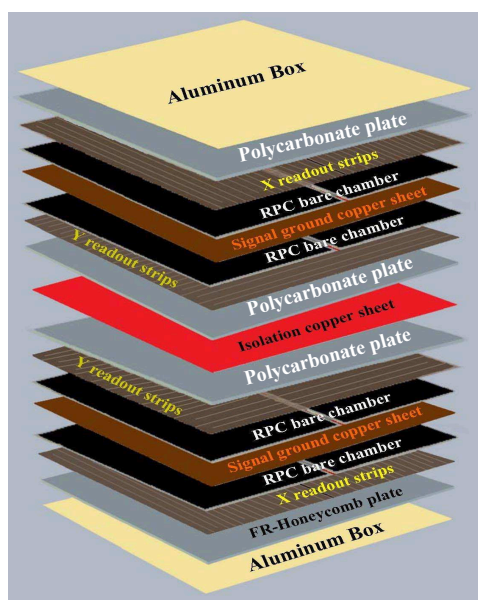


图 3.11: 模块内部结构详细示意图

4 层 RPC 中每层由 2 种大小的裸室组成，分别是 $1.1 \times 2.1 \text{ m}^2$ ， $1.0 \times 2.1 \text{ m}^2$ ，厚度是 6 mm。不同层之间裸室交错叠放（图 3.12），这样是为了减小死区，提高 RPC 的性能。

4 层 RPC 中，由中间的屏蔽地分成上下对称的两个部分。上面两层中间夹着一个共用的信号地，外侧紧贴各自的读出条，这样每层读出条之间保证有地相隔，以防串扰。每层 RPC 有 8 道读出，每道读出条是大约 26 cm 宽。四层的读出条方向的顺序为 XYYX（定义 X 方向朝向模块前端面板），模块相当于被分成了 $8 \times 8 = 64$ 个小块（patch）。这样在 26 cm 范围内能确定 μ 子击中信息，位置分辨约为 7.5 cm。大亚湾对宇宙线本底的位置分辨要求不高，主要是给出 μ 子标记，通过时间 cut 来去除宇宙线的本底，从而得到纯净的中微子信号，7.5 cm 的位置分辨，对物理目标基本没有影响。读出条采用“Z”字形回旋条的形式，即把 26 cm 又刻为四等份，每份 6 cm 宽，但每份没有完全刻断，首尾相接，读出条其实相当于 6 cm 宽 8.4 m 长。每条读出条有两个 27Ω 的电阻连接屏蔽地（图 3.13）。

在模块底部是 2 cm 厚的蜂窝板（FR-Honeycomb plate）。蜂窝板既有绝缘作用，又有支撑作用。上下紧贴中间屏蔽地的是两个 1 cm 厚的阳光板（Polycarbonate plate）。阳光板起到绝缘作用。最上层的 RPC 上面也是同样厚度的阳光板，跟蜂窝板一样，也是起到隔离作用。

模块中的气体高压和信号线最后通过前面板连接出去。前面板上中间是 32 路信号线，接前端电子学板（FEC，由中国科技大学负责）。再往两边是 8 路固定到铝

盒上的气管接头，内部已经连接好，外部连接 $\phi 6$ 的气管通往气体系统（由美国普林斯顿大学负责）。再往外是高压出口，16 路高压线从这里出来，连接高压分配盒（RPCIs，由美国弗吉尼亚理工负责）。

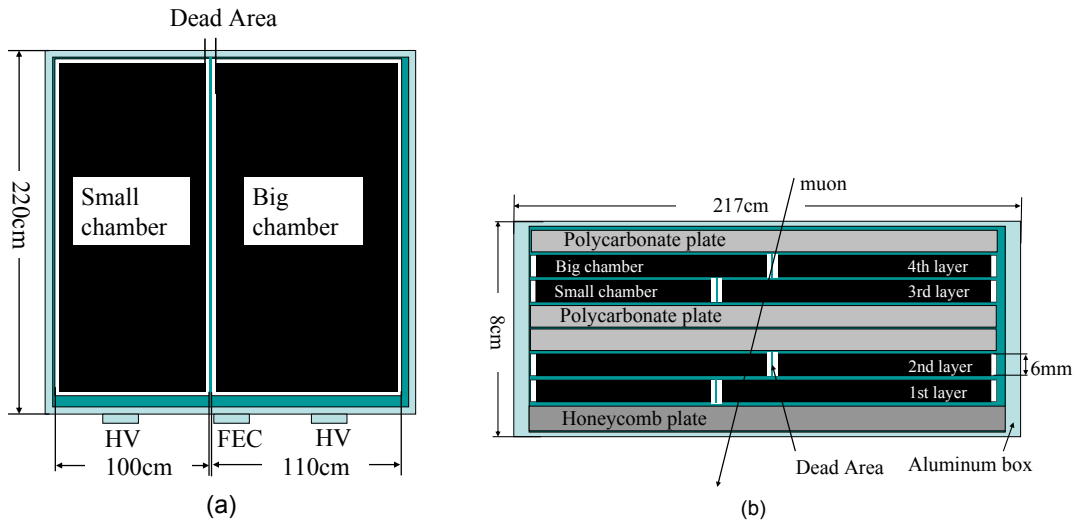


图 3.12: 模块内部结构简化示意图。(a)为俯视图，(b)为横截面图

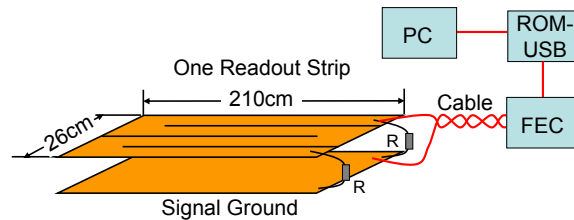


图 3.13: RPC 电子学读出示意图

3.3 大亚湾 RPC 裸室的制作

裸室是 RPC 反符合探测系统的探测元件，裸室的好坏直接决定着以后 RPC 系统的宇宙线测量的优劣，所以裸室的生产和测试是质量控制中的重要环节*

大亚湾 RPC 裸室（简称裸室）有两种规格，一种是 $1.1 \times 2.1 \text{ m}^2$ ，一种是 $1.0 \times 2.1 \text{ m}^2$ ，厚度都是 6 mm。每个裸室是由上下各 2 mm 的阻性板（酚醛树脂板）夹起来，中间留 2 mm 的气隙，四周用密封塞来密封，在两端对角处各留一个气口来进气和出气。气隙内部每隔 10 cm 还有 2 mm 高的小垫片（spacer）来支撑上下阻性板，以

*详细内容请参照马烈华博士论文 [72]。

保证 2 mm 气隙的均匀性。

大亚湾共需要 $200 \times 8 = 1600$ 个裸室，准备生产 2000 个，其中一半是大室，一半是小室。生产公司是北京高能科迪公司（GNKD）。该公司具备了成熟的生产技术，BESIII 使用的 RPC 也是该公司生产，性能优良。裸室的生产测试流程见图 3.14:

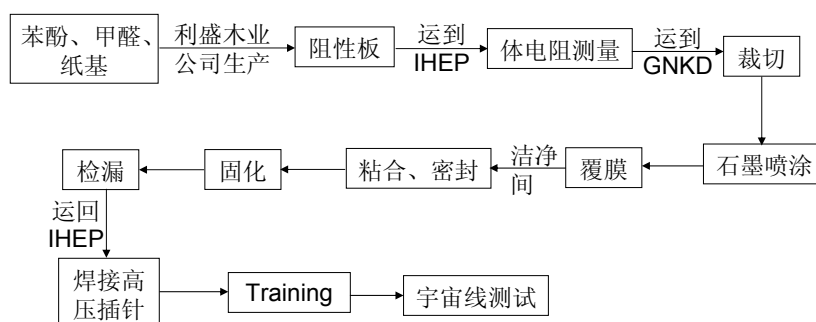


图 3.14: 裸室生产流程

1) 生产酚醛树脂板（阻性板）。阻性板（bakelite）是由苯酚、甲醛和纸基加适量的融合剂和固溶剂等生产出来的。阻性板长宽为 $2.3 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ 左右，厚度控制在 $2.0 \pm 0.02 \text{ mm}$ 。

2) 体电阻测试。生产出来的阻性板，运往高能所，在高能所测试其体电阻，选择条件是在 20°C 时，9 个测试点的体电阻率值必须在 $0.5\text{-}2.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间，否则弃之不用。

3) 将合格的阻性板运回高能科迪（GNKD）公司，进行 RPC 的制作。

① 裁切。将阻性板裁剪成两种规格，以生产两种大小的裸室。裁切尺寸误差控制在 0.1% 以内。

② 石墨喷涂。石墨作为 RPC 的电极，喷涂这一关的好坏，也直接影响到 RPC 的性能。由熟练的技术工人使用喷枪手工完成。喷完之后在空气中暴露 24 小时，使溶剂充分蒸发，再进行面电阻的测量，测量要求平均值在 $400\text{-}1000 \text{ k}\Omega/\square$ 。

③ 覆膜。使用覆膜机把 $100 \mu\text{m}$ 厚的 PET 膜覆盖在石墨外层。PET 膜内表面有热熔胶，覆膜的时候，在覆膜机的加热加压下使膜与石墨层牢牢粘紧。

④ 密封。在准备好阻性板后，移入洁净间，进行裸室的合成。在阻性板上使用环氧胶将每隔 10 cm 的垫片，四周边上的密封条，两头的气嘴和导电铜胶带固定，上面也涂上胶，然后将另外一块阻性板扣上。这样一个完整的 RPC 就初步制成了。在阻性板的喷涂之前和阻性板移入洁净间的前后要使用酒精擦洗表面，以免灰尘污染。整个过程每一环节都要保持清洁。

⑤ 固化内部环氧胶。采用重物、钢板等加压和内部抽真空两种方式等待 48 小时。

⑥ 检漏。使用 U 型管一端接到裸室一口，在另外一端打气，压力至 30 cm 液面差，等待 30 分钟，液面差降低在 2 mm 之内，则认为合格，否则重新检查制作。

4) 高压插针的焊接。合格的裸室贴上标签，运回高能所，进行高压插针的焊接。根据裸室在模块里的不同位置，插针需要做两种方向，一种是与气嘴方向一致，一种是相反。然后使用热熔胶将其密封，只留插针头在外。

5) Training（又叫老化或者老炼）。焊接好插针的裸室，放置至少 24 小时，等胶充分固化后即可进行裸室的 Training。将裸室放到 Training 架上，通入纯氩气（Ar）加 10000 V（正 4000 V，负 6000 V）高压，进行裸室内部的高压打火，将内表面的灰尘或毛刺烧干净，降低暗电流和单计数率，training 至少要 48 小时。

3.4 模块的制作

探测器由单元部件组装而成。组装的好，探测器就能最大程度上发挥其性能；组装的不好，探测器的性能就会大打折扣，寿命也会降低。RPC 室有电压，高到 8000 伏，低到信号输出的 100 mV，而且两者挨的比较近，它们的关系在装配时候必须处理好。刻录的读出条也必须严格把关，防止相邻读出道双计数（double counting）。模块需要从北京运往 2000 公里外的深圳，装配过程中必须严格控制各个部件连接的牢固性等。所以 RPC 模块的装配工艺在模块的性能发挥中也起到举足轻重的作用*。

3.4.1 读出条的刻录

大亚湾 RPC 读出条材料是厚 35 μm 铜箔与环氧玻璃纤维基板层加压成型的覆铜板。覆铜板厚度为 250-300 μm ，长宽为 $2.1 \times 1.1 \text{ m}^2$ ，在刻录之后需要先将读出条裁切成大小为 $2.1 \times 1.05 \text{ m}^2$ 。每块覆铜板在长度方向上刻四条读出条，两块覆铜板拼接一块组成模块中一层的读出。

对 RPC 读出条的刻录，专门制作了一台机器（图 3.15），实现机器刻录，这是第一次在 RPC 的读出条刻录上实现机械化。读出条刻录机是在电路板刻录经验上，将刻录臂做大，同时保证刻录的走线精度，将刻录台做成可移动带抽风系统的高精度台面。针对覆铜板材料，采用特用的洗头，并针对大亚湾的读出条走线和刻录的特点，使用专用程序进行控制。

检查覆铜板表面平整清洁、无突起、凹坑、无划痕，无手印、油渍等污物，然

*此部分内容由高能科迪公司、高能所的老师 and 同仁共同完成



图 3.15: 读出条刻录机。左图是全貌, 右图是刻录头的细节显示

后将覆铜板放到刻录台上, 精确定位, 使用胶带粘住两头, 并将抽风系统打开, 使读出条紧密贴到刻录台上。在电脑上将专用控制程序打开, 设定好参数, 刻录机将自动刻录, 刻录完一半移动台面, 继续下一半的刻录。刻制完成后, 检查是否和图纸要求一样, 如果合格, 再最后按图纸规格裁剪成 $2.1 \times 1.05 \text{ m}^2$ 。裁完后, 用平尺测量中心线是否和图纸一样, 并用细砂纸轻磨边沿, 不能有毛刺。

3.4.2 组装前组件的准备

1) 裸室检验包装

a) 检查漏气: 向裸室内注入空气, 气压达到 40 cm 水柱, 密封 5 分钟时间, 检查气压变化情况。要求水柱下降小于 2 mm。检查过程中有一定数量的裸室有漏气现象, 主要原因是裸室边缘开胶、气嘴断裂, 源于搬运过程中叠压错动, 对于这种裸室重新密封胶检验。

b) Mylar 膜绝缘保护: 在裸室两面再加一层 Mylar 膜, 主要目的是防止之前安装的 Mylar 膜因加工搬运可能形成的损坏, 造成加高压的石墨层与读出条之间放电。

c) 高压线引出保护: 高压线采用耐压一万伏的聚四氟乙烯线。在气管附近有高压线引出头, 插接高压引线, 用双面胶加贴一层 Mylar 膜绝缘。

d) 边缘爬电保护: 使用专用的内高压胶带将裸室四周的 1 cm 边死区包起来, 主要目的是防止高压从石墨层边缘沿 1 cm 死区爬电到读出条。

2) 读出条、地的连接

将两片匹配的刻好的覆铜板读出条使用宽 4.5 cm 的胶带单面粘接成 $2.1 \times 2.1 \text{ m}^2$ 。粘接要求保证接缝均匀, 缝两侧的读出条不能有连接。

RPC 的信号地使用同样的覆铜板。将两块覆铜板拼接, 在两头处使用薄铜片连接, 并将薄铜片和两覆铜板使用锡焊接牢固。

3) 信号线准备

准备双绞扁平电缆，按照读出条距离引出位置的远近，对信号线进行剥线、裁线，使每对信号线长度对应各自的读出条，所有线在焊点旁留出一定余量，以保障焊点不受电缆牵引。剥线要求用专用剥线钳，不得伤及信号线。在双绞扁平电缆外分段用热缩套管热缩成型，一方面保护信号线，一方面减少信号线体积，以保证在有限的走线槽内，方便安全地放置信号线。安装前用万用表测量每一道读出条与相邻读出条是否短路。在导线、读出条焊接点上按工艺要求镀锡，焊点有严格的尺寸和外形、表面光洁度要求，每个点焊接时间不大于两秒。

4) 蜂窝板挖槽

远端的 8 根高压线需要绕铝盒侧面的边缘从近端前面板（图 3.12(a) 中 FEC 端面为近端，相对的面为远端，其他为侧面）走出。铝盒的侧面空间狭小，为了充分利用空间，将底层的蜂窝板边缘开个细槽。高压线走细槽，节省了空间，而且避免了跟读出信号的串扰。

3.4.3 模块组装

1) 将铝盒放置到平台上，并用吸尘器吸掉铝盒内部缝隙以及蜂窝板上的碎末、灰尘，用酒精仔细清洁整个铝盒。

2) 布置远端高压线：8 根负高压线走蜂窝板边缘走线槽，在拐弯处使用塑料螺旋管套住来保护，在前面板走铝方管内部，在进入方管的拐角处套热缩管，并用电缆固定扣固定。

3) 布置气管和信号线。气管和侧面二三层信号线在前面板上走方管内部，然后气管连接出气接头，信号线从中间孔引出（图 3.16）。两个侧面内部同时贴上麦拉膜，防止信号跟铝盒短路。

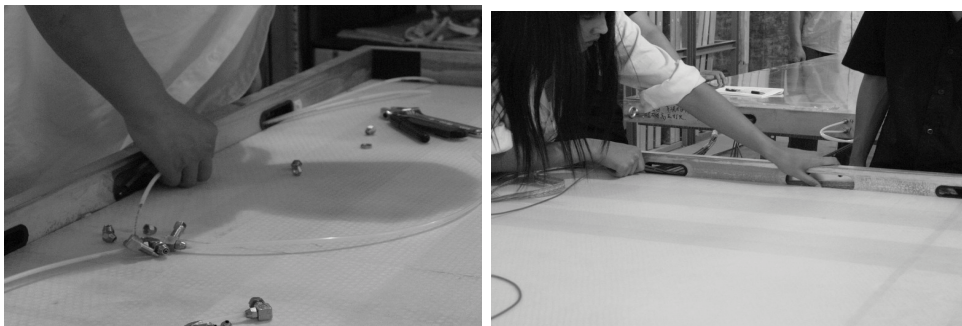


图 3.16: 气管信号线在前面板走线

4) 在铝盒内放置第一层读出条的信号层，读出条方向朝前面板，即为 X 方向引

出。读出条与蜂窝板之间用双面胶粘接。然后焊接各道的信号线以及匹配电阻。

5)放上第一层 RPC 裸室。左侧为小室，右侧为大室（第三层 RPC 放置方法与此同）。裸室摆放靠近铝盒的左上角（从图 3.12(a) 看上去），目的是为了右边留出空隙来走线。在四周使用适合宽度的橡胶块塞紧固定。连接各块 RPC 对应的高压线和气管，仔细检查高压线连接的强度和牢固程度，如有力度不强的接头，立即更换。气管加胶时切记防止进入气管口，严防发生气管阻塞。

6)铺读出条地层，位置与信号层对齐，有焊点的两边伸出 RPC 约 1 cm。在前面板焊接第一 RPC 各道的信号电缆地线及匹配电阻。在侧面 Y 方向焊接第二层信号电缆地线及匹配电阻。在前面板处焊接引出地线，并在焊点上加绝缘保护。测量确认每根读出信号线的对地电阻为 $14.5 \pm 0.5 \Omega$ ，两根信号线之间的电阻为 $28.5 \pm 0.5 \Omega$ 。

7)放第二层 RPC 裸室。左侧为大室，右侧为小室（第四层 RPC 放置方法与此同）按照前面第5步的方法固定并接上高压线和气管。

8)铺第二层 RPC 的读出条信号层。读出条与 RPC 用双面胶粘接。焊接第二层的各道信号极匹配电阻，按照前面第 6 步测量检查确认焊接情况。

9)铺阳光板。四周缝隙塞上橡胶条固定。铺屏蔽地，并在前面板附近焊接引出地线。铺第二层阳光板。

10)按照一、二层的方法安装第三四层 RPC 及读出条。第三层的读出条按照 Y 方向，第四层的按照 X 方向。

11)检查确认。检查安装、焊接、布线等各道工序无误。对于高压加载设定范围为：

$18^{\circ}\text{C} \leq \text{室温} \leq 28^{\circ}\text{C}$ ，加载 8000 V 电流 $\leq 300 \mu\text{A}$

$28^{\circ}\text{C} \leq \text{室温} \leq 35^{\circ}\text{C}$ ，加载 8000 V 电流 $\leq 500 \mu\text{A}$

超出这个范围为不合格。高压上升过程中需注意电流的变化，上升过程中的电流会大过高压稳定后的电流，这时 RPC 充电，属于正常情况，高压在 4000 V 稳定后，每对正负高压的电流值应基本相等。用 U 形管检查每层 RPC 的气密情况，方法同裸室检漏。

12)加盖固定。上铝盒盖内侧有一层阳光板，阳光支撑板在读出面要削去大约 1 cm，保证支撑板不压在电阻上。盖上铝盒盖，拧上四边螺丝。

3.4.4 工艺要求

1) 安装前确保 RPC 型号正确，外观良好无破损，高压插针不松动。

2) 所有信号电缆，气管，高压线要求长度适宜，连接处要有富余避免直接受力。信号电缆和高压线用绑带和吸盘定位片与铝盒固定。走线时避免与蜂窝板、阳

光板的尖锐边接触。模块内的尖锐边、角均须用胶条胶布包裹以免割伤电缆。所有引出的信号电缆和高压线要求不能轻易受力脱落或断开。由于高压、气管、地线在同一个引线槽内引出,安装时利用气管等使高压和地线相隔离,避免高压线与地线贴在一起。

3) 气管连接紧密,不允许漏气,与RPC气嘴连接处须涂胶,着重防止溢胶堵气管。

4) 各焊点光滑圆润,大小适宜,不允许虚焊。每道读出均须用万用表检查是否正常。

5) 各层读出条均需跟相邻RPC、蜂窝板、阳光板用双面胶粘接固定,不能滑动。各层RPC、阳光板与铝盒边缘的缝隙必须用橡胶条严密固定,保证不能移动。

6) RPC边缘绝缘耐压膜以及上下表面麦拉膜须完整无破损,气嘴高压头连上高压线后用麦拉膜加高压膜完整包裹避免漏电。

7) 所有匹配电阻外部套热缩管保护。所有信号电缆,高压线,气管必须贴标签区分。

8) 每一道工序出操作人员检查外,必须有第二人检查确认无误后再开始下一道工序。

3.5 本章总结

本章简要介绍了RPC气体探测器的基本知识及工作原理。

详细介绍了大亚湾RPC模块的设计和研究。包括模块单元的大小和层数的设计,不同触发模式的研究。介绍了模块大小为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$,内部4层符合的设计概念,将来在线取数采用 $2/4$ 的触发模式,离线分析采用 $3/4$ 的触发模式,在某些层的RPC裸室损坏的情况下可以使用 $2/3$ 或者 $2/2$ 触发模式。简要介绍了读出条宽度及匹配电阻的研究,确定模块读出条为 2 m 长 26 cm 宽回旋条,匹配电阻为双端 $27\ \Omega$ 。根据以前经验,对高压和气路设计成每层独立供气的概念。对设计的单元模块做了形变测试,模块在设计 1.2 m 跨度的支撑结构上形变 6 mm ,不会影响将来的物理测量。

介绍了RPC裸室的生产控制流程。详细介绍了模块的制作、装配流程和装配工艺。采取各方面措施保护高压漏电,利用铝盒内狭小空间,合理布置走线,将探测器各个部分有条不紊的装配成一个有机整体。

第 4 章 RPC 探测器的测量

在 RPC 探测器设计和生产出来之后，必须进行探测器的各方面的测试，进行检验和判选，这是探测器能够有效工作的保证。一般使用宇宙线 μ 子进行 RPC 探测器的测试。大亚湾 RPC 探测器的测试分为裸室的测试和模块的测试两部分。对于裸室的测量论文 [72] 中进行了详细的论述，这里只进行简单的介绍。本章将重点介绍模块的宇宙线测试实验、分析和结果。

4.1 RPC 裸室的测量

生产出来的裸室需要进行宇宙线的效率测量，来最终判断裸室性能的好坏，也是对裸室从物理方面进行质量检验的重要环节。

裸室测量使用四重符合的方式。上下三个闪烁体作为望远镜（上面一个，下面两个），中间放置被测 RPC 裸室。图 4.1 是测试示意图 [72]。

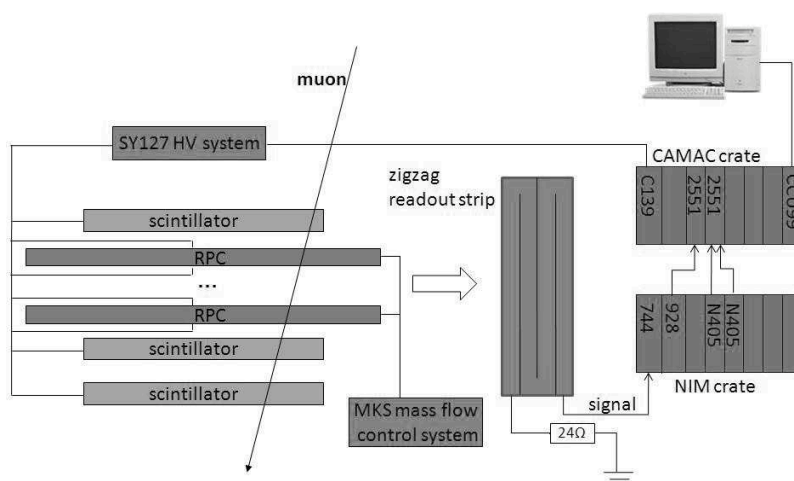


图 4.1: RPC 裸室的宇宙线测试系统示意图

闪烁体长宽各是 1 m 规格，小于裸室的面积，可以保证穿过三个闪烁体的宇

宙线 μ 子必穿过 RPC 探测器，正好可以用来测量上下正对的 1 m^2 区域的裸室效率。把这 1 m^2 的效率当作是整块裸室的效率。中间被测裸室最多可放 6 层，即能同时测量 6 块 RPC 裸室。测量使用的工作气体是氩气 (Ar)、四氟乙烷 ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ 或 R134a)、异丁烷 ($\text{i-C}_4\text{H}_8$ 或 Isobutane) 三者的混合气体，采用的气体比分为 $\text{Ar/R134a/Isobutane} = 53/43/4$ 。气体流量的控制由 MKS 的质量流来控制。闪烁体使用的光电倍增管的高压为 2050 V，在整个测量过程中不变；裸室高压由控制软件从 6000 V 到 9000 V 变化，每 100 V 测量一个点，每次是 100 s 时间，扫描 5 次，达到统计量为每个点 10000 个计数，所以效率误差在 0.2% 左右。测时间温度范围控制在 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 。电子学使用 NIM 插件，裸室的甄别域设为 50 mV，望远镜设为 15 mV。每层裸室都有 4 条感应条，即有 4 道读出，4 道进行电子学“或”，然后与三个望远镜进行“与”，得到计数作为分子；三个望远镜直接“与”得到的计数作为分母，即得到裸室的效率。每天测量两波，每周按照 5 个工作日计算，测试速度最快为每周 60 块裸室。

截止目前为止，测量了共约 1600 块裸室，效率、单计数和暗电流的统计结果见图 4.2。

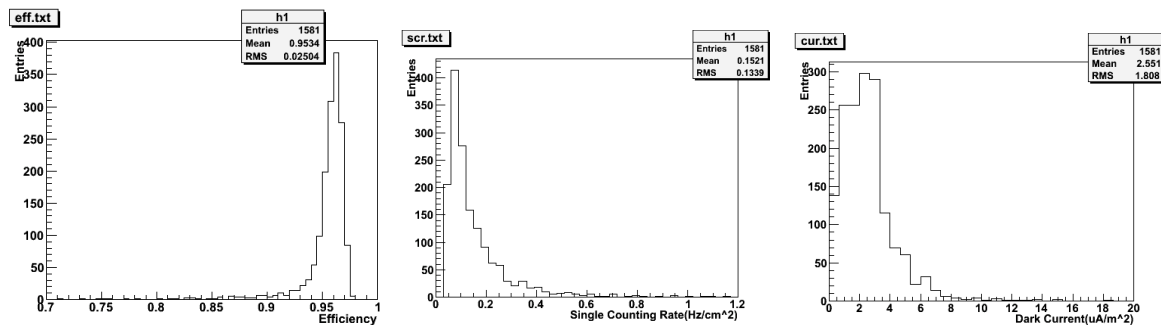


图 4.2: 在测量环境下裸室在8000V高压时效率、单计数和暗电流的统计分布

可以看出在工作点 8000 V 情况下，裸室平均效率达到 95.34%，分布还是比较集中。通过选择标准（裸室效率达到 95% 以上）选择以后，裸室的平均效率高于 96%。裸室单计数的平均值在 0.15 Hz/cm^2 ，测量中把单计数超过 0.8 Hz/cm^2 的认为不合格。暗电流的平均值为 $2.55\text{ }\mu\text{A/m}^2$ ，测量中把暗电流高于 $10\text{ }\mu\text{A/m}^2$ 的认为不合格。

4.2 RPC 模块的测量

RPC 探测器模块设计组装完成后，其物理方面的探测能力，装配质量，需要通过模块测量来进行研究和最终的合格判选。探测器的气体、高压、电子学各个部分

的有机配合也需要在测量阶段进行研究，为将来在大亚湾地下的运行提供经验。所以模块的测量是现场实验前探测器的各方面总体检验，是必不可少的重要环节。

4.2.1 RPC 模块测试系统的介绍

测量系统由测试架、升降机、配气系统、高压系统和取数系统组成。测试架（约 2 m 高，图 4.3 左）上可一次放置六个待测探测器模块（实际测量使用的是 5 层），由测试架中间六层带有滚轮的刚性机械结构提供支撑。升降机用来将探测器模块提升到适合的高度，以便推进这六层中的任意一层。宇宙线望远镜系统由位于测试架最底层处的两个探测器模块和最顶层的一个探测器模块组成，这三层探测器模块的符合信号作为宇宙线 μ 子的触发信号，用来测量中间各层探测器模块的效率。

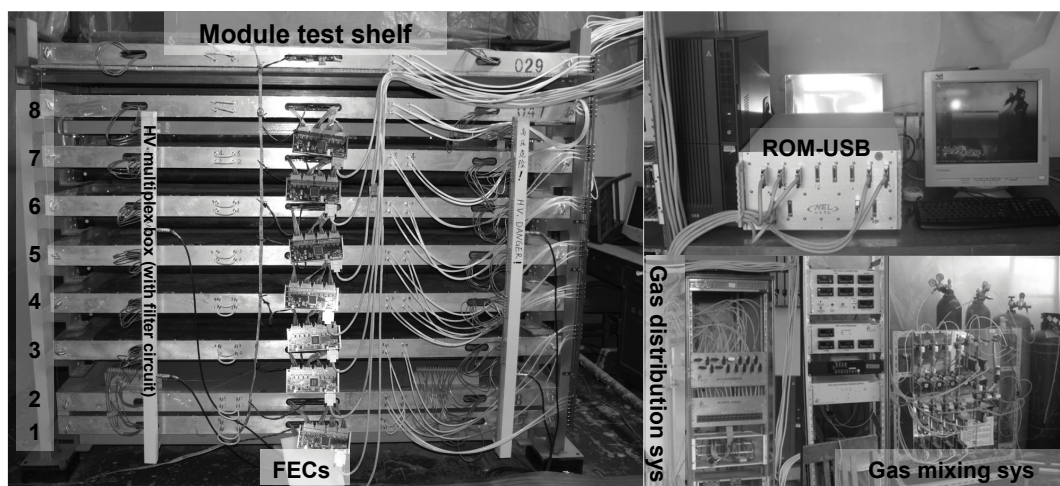


图 4.3: 模块测试系统

4.2.1.1 气体系统（图 4.3 右下）*

RPC 工作气体使用混合气体形式，四种气体的比分为氩气: 四氟乙烷: 异丁烷: 六氟化硫 (SF_6) = 65.5%: 30%: 4%: 0.5%。模块换气过程中总流量是 800 sccm，换气 5 个体积，测试过程为 200 sccm，约 1 个体积每天，跟大亚湾实验欲使用的换气速率相同。气体由气瓶出来，进入混气面板，使用 MKS 公司的质量流 (MFC) 控制，然后在气管内对气体混合，然后经气体分配面板，分配 16 路，供应 8 个模块。每两路控制一个模块，每路控制模块中的两层 RPC，即控制 4 个裸室。将来大亚湾也是这种供气方式。气体经过模块出来，经过泡泡瓶，最后由废气管排出（图 4.4）。

* 由普林斯顿大学提供

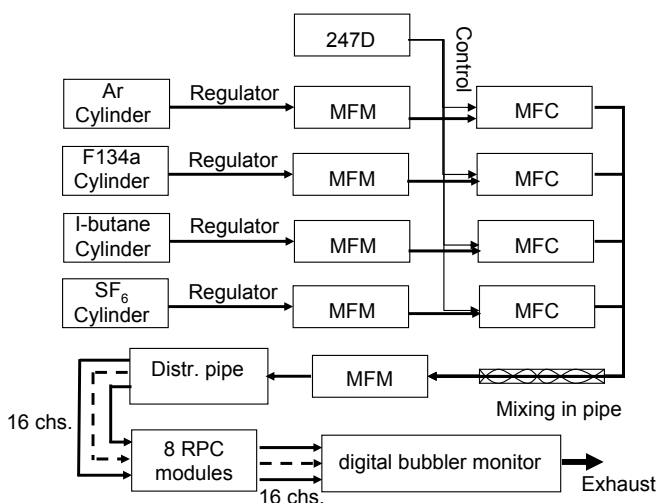


图 4.4: 气体流通示意图。

4 路质量流由 MKS 247D 机箱来控制，通过调节 247D，可以调节气体比和通气速率。混气面板上除了 4 路 MKS 质量流控制外，还有 4 路质量流（MFM）来进行每道监控，四路气体混合完成后还有一个 MFM 进行总的流量监控。混气面板（图 4.5）上除了有质量流控制比外，在质量流之前还有一个气动阀门是做四路气体同时开关使用。正常运行时气动阀常开，气压大约是 5 个大气压，将 4 气路打开。如果一种气体快用完，气路中气压降低，当气压低到气压监控模块设定的阈值的时候，就会给气动阀一个信号，让气体释放，四路气就同时关闭，保证探测器中气体比不变，同时报警系统给出警报。

气体的分配面板（图 4.6）是在每个气路中使用气阻（gas resistor，也称毛细管）串联在气路中，选取的 16 路毛细管气阻值基本相同。整个气路的气阻为毛细管气阻加上模块气阻还有气路上 6 mm 直径气管的气阻，毛细管气阻比较大，所以模块和气管的气阻可以忽略，所以各路气体气阻基本相同，流量相应的也相同。

在进气口经过毛细管后，还并联了一个保护瓶（图 4.7）。若模块气阻太大，或者模块堵塞，气管里的气压会升高，会破坏模块，造成崩室，加入保护气瓶后，如果模块的气阻太大，气体会经过保护瓶冒泡直接排到废气里，形成对模块的保护。

为了监测模块是否有漏气，及各道出气速度，在出气口有泡泡瓶（bubbler）监控（图 4.6 左上）。出气口插入油中，在出气的时候冒泡，在气泡的两侧有一个光电面，气泡通过光电面会被记录，经过记录气泡速率，即可知道流速多少，然后由电脑定时显示（图 4.8），这个监控将整合到大亚湾的慢控制系统里。

大亚湾现场的 RPC 探测器气体系统跟在高能所使用的 RPC 模块气体系统在主要部件上是一样的。

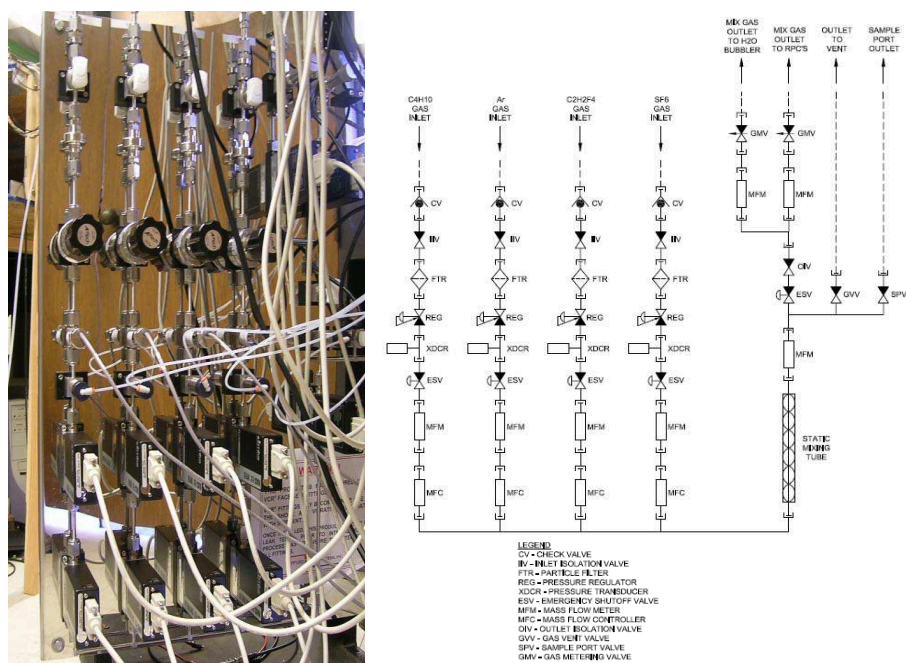


图 4.5: 气体混合面板。

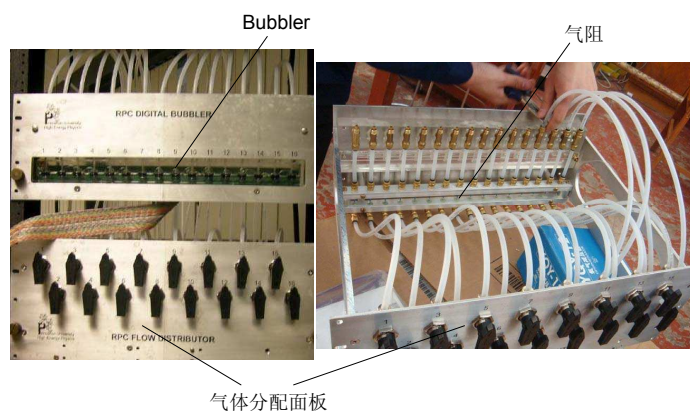


图 4.6: 气体分配面板。左图为前面看气体分配面板和 bubbler，右图表示从上面看里面的气阻位置

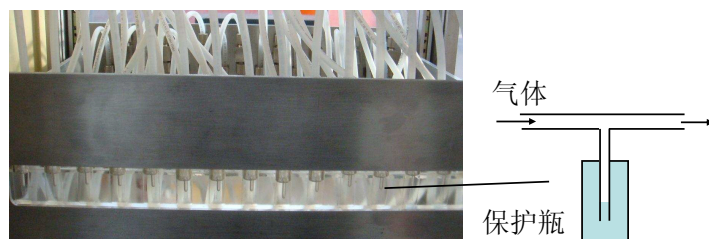


图 4.7: 气体保护瓶。左图为 16 路的气体保护瓶面板，右图为其中一个的示意图

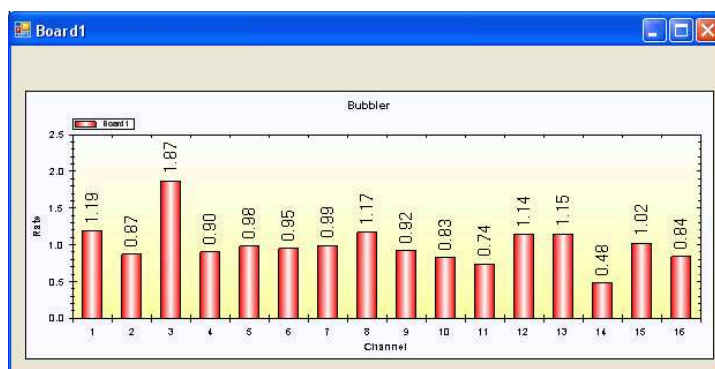


图 4.8: 每道气体流速图。

4.2.1.2 电子学系统*

RPC 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。大亚湾 RPC 电子学系统主要由 4 部分构成：前端电子学板（Front-End-Card, FEC）、读出收发器（Readout Transceiver, ROT），触发模块（RPC Trigger Module, RTM）和读出模块（ReadOut Module, ROM）（图 4.9）。每个 RPC 模块产生的 32 路感应信号由 FEC 读出。FEC 将 32 道信号进行甄别转换成数字信号，然后按照本地触发逻辑给出相应的触发信号。触发信号经过 RTM 处理后被送回 FEC 以决定是否保留并传输该事例的数据。被传输的数据经过 ROM，通过 VME 总线送到 DAQ 作进一步的处理。

每个 FEC 连接一个 RPC 模块，所以大亚湾 3 个厅共需要 FEC 数量为 $54 + 54 + 81 = 189$ 个。一个 ROT 控制 15 或者 12 个 FEC，需求总量为 $4 + 4 + 6 = 14$ 个。ROM 和 RTM 是每个厅一个，所以各自需要 3 个。

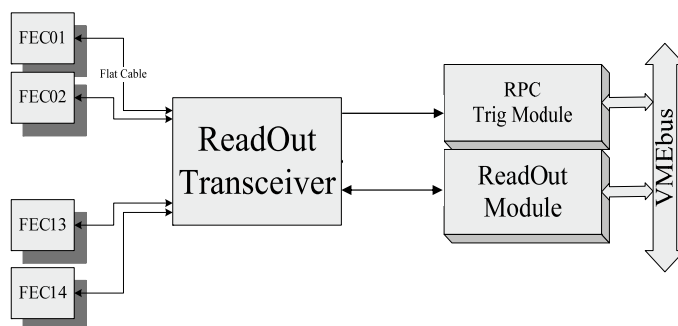


图 4.9: RPC 电子学系统示意图。

* 由中国科技大学提供

在本章要讲述的模块测量系统里，使用的不全是大亚湾实验要用的这 4 部分，中国科技大学（USTC）专门为模块测试做了一个测量系统 [92]（图 4.10），也是他们对大亚湾 RPC 实验进行电子学研究的模型（prototype）。模块测试使用的 FEC 跟大亚湾将来实验是完全一样的，但上位机是 USB-ROM，而不是现场使用的光纤传输到 ROM、RTM，但逻辑方面是类似的，这也为大亚湾的电子学运行提供了经验。

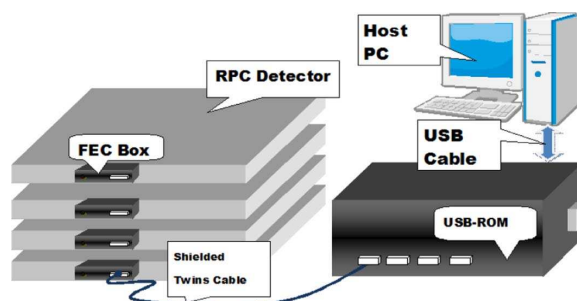


图 4.10: 电子学测量系统模型

• 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，并使用 FPGA 在内部进行逻辑触发判选，决定数据的取舍。

32 道信号在 FEC 上进行甄别转换成数字信号，其宽度采用跟随模式。对于宽度小于系统 40 M 时钟的一个时间周期的信号，则采用双 D 触发器，将信号展宽成 3-4 个周期的数字信号，然后存入流水线缓冲器。同时进行本地的逻辑触发处理，若符合 4 选 2，则为一个本地触发信号（local trigger），然后将其展宽为 16 周期，送到 RTM。同时 FEC 也接受 RTM 返来的触发命令，进行 16 选 5（连续 16 个周期中有 5 个连续高电平）判断。若判断为真，则进行数据的打包，将数据存入缓存，然后经由数据并转串上传。这些功能都是在 FPGA 中实现的。

大亚湾 RPC 电子学 FEC 的核心是 FPGA，并采用远端配置下载 FPGA 固件的方式，也就是说所有 FEC 的固件是可以在线更新的。通过 USB-ROM 测试板或 ROT 板发出的被动串行配置命令，FEC 可以实现在系统中不需拆卸的远程配置。

• ROT

由于大亚湾 FEC 的数据和 VME 距离较远，为了提高数据的可靠性和抗干扰能力，选用光纤传输。ROT 就是将 FEC 通过双绞线传输过来的数据和状态信号等电信号通过转换为光信号，然后通过光纤将数据传到 VME 的读出插件 ROM 和 RTM。文章 [93] 给出了大亚湾系统中使用光纤进行传输的可靠性。

• USB-ROM

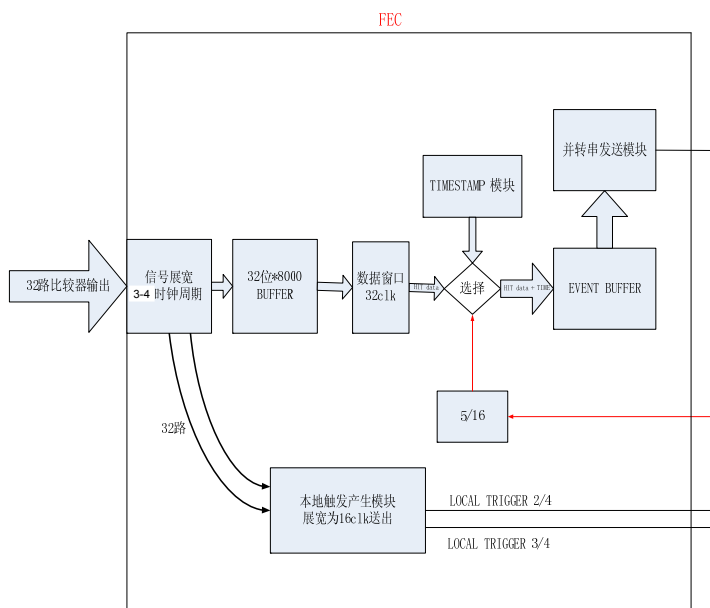


图 4.11: FEC工作流程图

大亚湾 ROM 是信号传送到 DAQ 系统的前一站，包含了 6 个光学子模块，分别收集和处理 6 个来自 ROT 的光信号，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，将数据发送出去。而 USB-ROM 从结构和内部处理方法上与 ROM 相似，区别在于 ROM 的上位机为 VME 总线，而 USB-ROM 的上位机是 USB，而且不通过 ROT 进行光纤传输 [94]。USB-ROM 模块中的触发选择和处理模块具有大亚湾 RTM 的功能，数据处理模块具有大亚湾 ROM 的功能。

图 4.12 是 USB-ROM 的 FPGA 处理的逻辑框图。可将一系列由电脑传输过来的配置命令传输到 FEC，进行配置。在接受 FEC 传输过来的 2/4 和 3/4 信号后，由触发选通模块进行判断是哪块 FEC 传输过来的。用户可以根据设置来选通特定通道的触发信号或者屏蔽该通道的触发信号。经过选通的信号交给触发处理模块，实现我们需要的触发逻辑。同时触发处理模块还要将信号进行延迟展宽等操作，然后将指令返回 FEC。数据处理模块在接收到 FEC 送来的数据后，进行串并转换，经过判断和校验，送入缓存，然后给上位机收发的请求。模块测量是用的 ROM-USB，可以同时控制 9 个模块的 FEC 的收发数据。

4.2.1.3 高压系统

模块测试系统的高压使用 SY127 高压控制机箱，使用 CEAN 高压插件，引出正

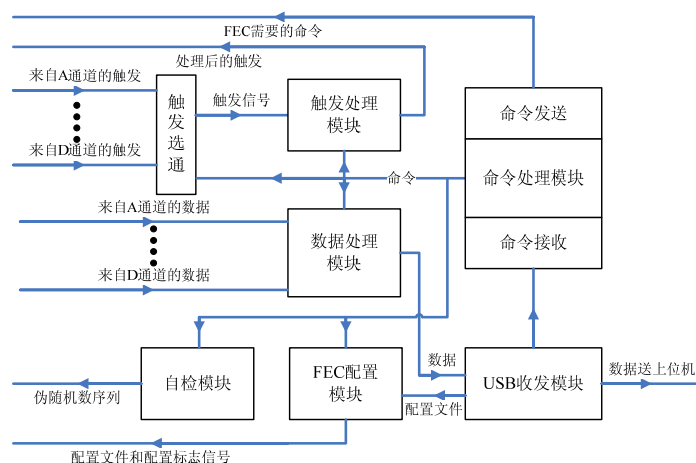


图 4.12: USB-ROM FPGA 逻辑框图

负各上下三路，最上面的一路供给上面 3 个模块，包括顶部的一个作 trigger 的 RPC 模块和两个被测 RPC 模块，中间路供给中间 3 个被测 RPC 模块，下面一路供给底部的 2 个作 trigger 的 RPC 模块。每路的供给中，都有高压分配盒串联，每个分配盒中有 8 路，供应一个模块的 8 路正或负高压。分配盒使用滤波电路（图 4.13）将高频信号过滤，电容值为 1 nF，电阻为 10 M Ω 。高压机箱上有电流显示，为每路高压的漏电流值，也就是每路对应的几个模块的总漏电流。通过模块的前期研究，高压选取 7600 伏。

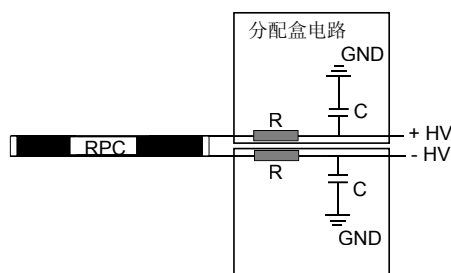


图 4.13: 分配盒滤波电路示意图。图中显示的是两个分配盒中各一路的电路。两路供应一个裸室。

大亚湾现场的 RPC 探测器系统的高压也是使用滤波电路和类似的分配盒将高压分配到各个模块。

4.2.2 模块测量的步骤和质量控制

为了规范 RPC 探测器模块的测量，我们制作了模块的测量步骤、实验中需要记录的数据和进行质量控制的标准。

• 测量的具体步骤

1) 将待测量的模块吊装到升降机的支撑面，调整模块到适当高度，将该模块推进测试架上的测试层。重复六次，直至装满测试架。

2) 使用铅垂线作参考，调整测试架上的探测器模块的水平位置，保证所有的探测器模块侧边在竖直方向对齐。

3) 连接各探测器模块的气路、高压线和FEC输入信号线，确保所有连接有效。

4) 打开配气仪前面板的阀门给探测器模块通气。设定流速为 800 sccm，连续通气 24 小时（换气大于 5 个体积）。此后调整流速为 200 sccm（对应换气率为每天~1 个体积）。

5) 给探测器模块加高压。

6) 打开 FEC 和 USB-NIM 电源，启动取数程序获取测量数据。

7) 间隔几个小时，记录漏电流值，气温、气压、湿度环境参数，每天至少三次。

8) 分析数据，得到测量结果

• 质量控制

根据模拟计算，及结合裸室测量的 95% 的效率标准，RPC 探测器模块的性能测量要求在如下方面保证模块质量：

1) 探测器模块能加上高压 7600 伏（+3800 伏，-3800 伏），而且正负高压漏电流偏差在 30% 以内。以此保证探测器模块内各 RPC 裸室高压连接正常。

2) 探测器模块各供气道外部出气口泡泡瓶冒泡，显示探测器模块内部气路正常。

3) 探测器模块接电子学系统测量，要求在选定的（由一定数量探测器模块的测量结果决定）工作高压、气体成份等条件下达到如下性能标准：

a) 单个 RPC 裸室效率高于 95%，以此保证每个 RPC 裸室线路管路均连接正常；

b) 探测器模块有效探测面积被 x 和 y 方向的感应条分为 $8 \times 8 = 64$ 个小区域，要求除去由于 RPC 裸室边框造成的死区外的所有区域四选三逻辑下的探测效率高于 95%；在有死区小块区域效率须高于 92%。

如果发现有探测器模块的测量结果不符合以上任何一条，该模块要求被送到装配小组进行检修。

4.2.3 信号测量

模块在装配好后，首先是要使用示波器观看信号，并进行信号各方面的研究。

工作条件和环境是：高压 8000 V（模块测量之前对模块进行研究的时候加的高压为 8000 V，正式测量使用的是 7600 V），温度 23 ± 1 °C，湿度 50%-70%，气压在 1000-1012 hPa，气体比分是 Ar: R134a: C₄H₁₀: SF₆ = 65.5%: 30%: 4%: 0.5%，阈值选 30 mV。

使用示波器得到典型模块的信号波形余辉图（图 4.14）。

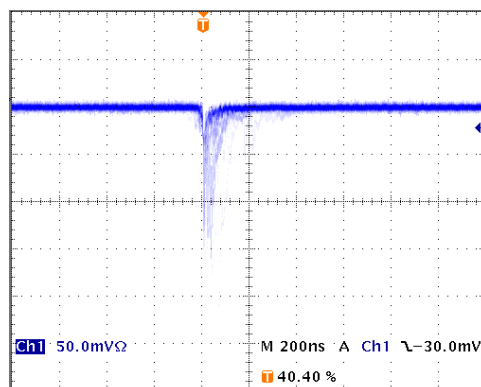


图 4.14: 模块信号

4.2.3.1 模块读出道的单计数

对于在上述测试条件下，将每路信号引出到 CEAN N431A 快速甄别器上，甄别器开 160 ns 宽窗口，然后由定标器（scalar）来进行计数。每道记数十分钟，达到几十万过域触发数，换算成每道的单计数率（single counting rate, SCR），得到图 4.15。左图是 4 个编号为 027、042、046、047 的模块 1、4 层各通道的单计数，右图是 4 个模块 2、3 层各通道的单计数。

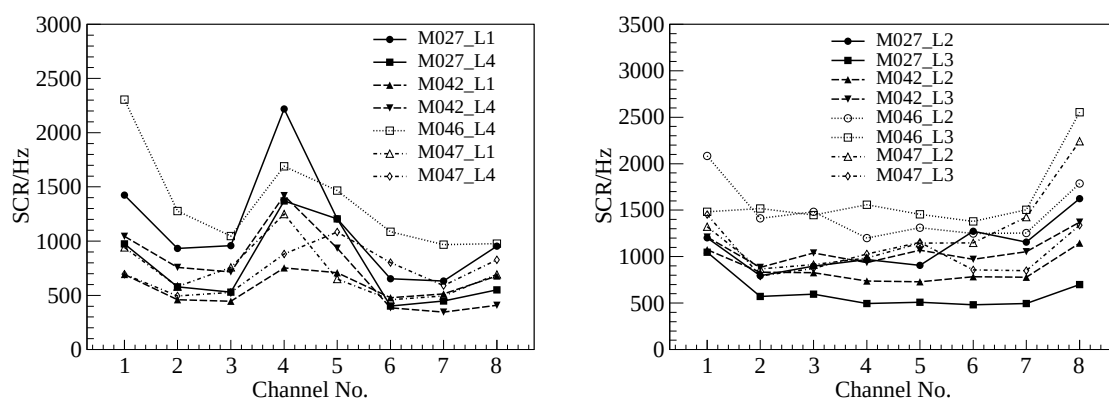


图 4.15: 不同读出条的单计数

模块平均每道的单计数在 1 KHz 左右，同时各道之间有起伏变化。在模块的

1、4层的单计数在各道之间有差异，但是表现出相同的起伏变化，即单计数在1、4、5、8道比较高，其他道比较低。在2、3层各道的单计数也有统一的变化规律，即在1、8道比较高，在其他道较低。这是由于RPC阻性板的边缘效应引起。从图4.16可以知道，在四层中1、8道读出条分布在边缘；1、4层的第4、5道道读出条也沿着RPC裸室的边缘；2、3层的第4、5道同其他相邻道一样，没有沿着边缘，单计数没有增加。所以可以得出，RPC的边缘对探测器有一定的污染，会增加通道的单计数。

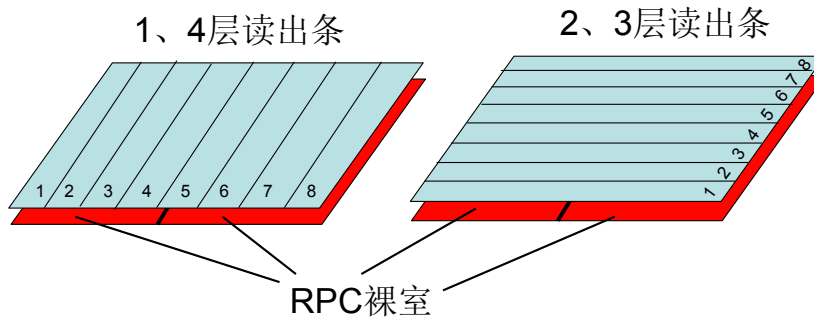


图 4.16: 读出条和 RPC 室的位置关系

图4.15还可以看出，在1、4层的第1道的计数要比第8道的高。本来8道读出条面积跟每层RPC面积相等，但是在RPC模块内部装配的时候，为了优化空间，裸室贴铝盒的左边（图3.12），因为裸室边上有1 cm的死区，读出条覆盖上去也感应不到信号，而2、3层右边正好需要读出条伸出RPC一部分，以方便焊接电阻，同时突起的焊点也不会把裸室的麦拉膜磨破，也能保证模块的厚度不会加厚，所以就将每层读出条都往右错出1 cm，但是各读出条是均匀的26 cm宽，其他道都覆盖在RPC上面，只有第8道多出1 cm，没有覆盖RPC裸室，所以第8道感应信号响应的就少了。同理在1、4层也是这样读出，需要所有读出条都往下方错出1 cm。总体相当于往右下方错出1 cm，这种非对称的读出条摆放，就造成了在第1、4层的第8道计数相对比第1道计数偏低，2、3层的1道计数相对比8道计数偏低。不过这种计数率的变化不会影响将来的测量信号。将来的测量使用的是4选3的信号，噪音的符合可以忽略。

4.2.3.2 读出道的 Cross Talk

宇宙线粒子在阻性板工作气体里电离，在读出条上产生感应信号。工作在流光（streamer）模式下的阻性板，在不同的工作条件下，streamer的面积大小会不同。如果信号产生在两读出条中间，则有可能在两个读出条上都有感应信号。同样streamer的光子也有一定的几率跑的比较远，使气体电离产生光电子，在非相邻的

读出条上感应出信号；另一方面宇宙线也有一定的 shower 几率，shower 打出的粒子也可能在不同条上同时产生信号；8 条读出条共用一个地，如果地线不稳也可能会造成相互的串扰。

• 相邻道的 Cross Talk

定义 Cross talk 比率 (R_{ct} ，也可简称 talk 比率) 为：

$$R_{ct} = \frac{C_{1\&2}}{(C_1 + C_2)/2} \quad (4.1)$$

其中 C_1 和 C_2 分别是两道的计数，分子是两道取“与”的计数，分母是两道计数的平均。

实验使用 CEAN N413A 做甄别，各道设置 30 mV，CEAN N405 做逻辑插件，窗口开 160 ns。图 4.17 是测量模块 027、047 的相邻道的 talk 比率。横坐标为 1 的点为第 1、2 道的 talk 比率；横坐标为 2 的点为第 2、3 道的 talk 比率；以此类推。

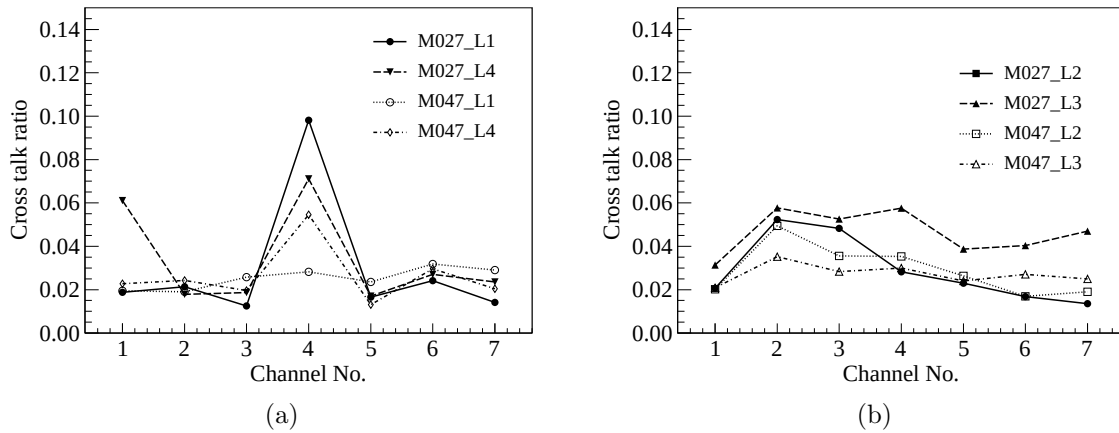


图 4.17: 相邻道的 talk 比率。(a)为模块 027、047 的 1、4 层各相邻道 talk 比率；(b)为两模块 2、3 层各相邻道 talk 比率。

从图中得知，在触发率都比较高的 1、4 层的第 4、第 5 道 talk 比率要比其他相邻道的触发率高。而边缘 1、8 道与其相邻道的 talk 比率没有增加。在大亚湾的气体比分下，读出条 26 cm 宽，相邻道的 talk 比率平均值约为 3%。羊八井 (Argo-YBJ) 的是 10%。这个差别主要是因为读出条宽度不同，羊八井的读出条宽度是 ~ 6 cm，大亚湾的是 26 cm，是他们的 4 倍宽，所以大亚湾相邻读出条的 talk 率应该比 Argo-YBJ 的小约 4 倍。另外，在气体比分、高压、海拔等方面的不同也会带来一些影响。

• 非相邻道的 Cross Talk

图 4.18 测量的是模块 047 的 1、4 层在同样的实验条件的非相邻道的 talk 比率。

横坐标位置为 1 的点是测量的 1、3 道的 talk 比率；为 2 的点是 2、4 道的 talk 比率；以此类推。

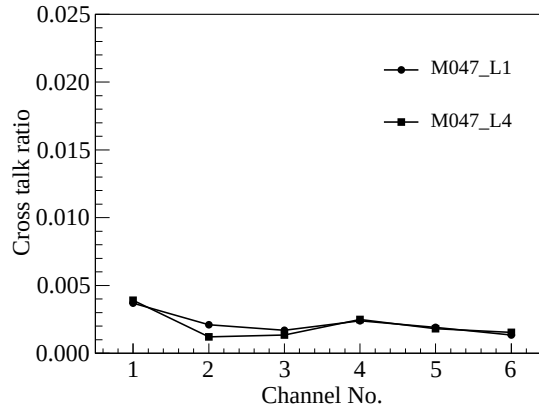


图 4.18: 非相邻道的 Cross talk

可以看出，虽然非相邻道的 Cross talk 也有变化，但是 talk 比率的数值已经非常小，比相邻道的小一个量级以上。羊八井的 RPC 这种情况下也是小了一个量级。

4.2.4 Trigger 模块及电子学的验证

测量 RPC 模块使用的是上下望远镜符合测量的方式。对于 RPC 模块 2 米长宽面积来说，一般没有这么大的闪烁体等探测器作为望远镜来测量到 RPC 模块的边角。大亚湾 RPC 探测器将来使用 26 cm 的小块，作为 μ 子的触发定位，需要将每个模块 8×8 的小块阵列测试到位。而对于 RPC 探测器来说，其本身也可以作为望远镜，每个面积模块相等，只要放置好，也可以用于模块符合测量，只要选取一定的触发信号就可以。但是 8 个模块是通过 8 块 FEC，共同由 USB-NIM（就是上节所说的 USB-ROM）来统一控制。这样模块通过电子学可能会有关联。而电子学的 prototype 之前只是进行实验室仿真模拟，在大亚湾 RPC 模块上进行实地测量也是第一次，必须使用另外一种方法验证其可靠性。我们使用了闪烁体符合测量和电子学外触发两种方式验证。

4.2.4.1 闪烁体符合测量

闪烁体符合测量（图 4.19）是使用上下三个塑料闪烁体 S1、S2、S3 进行逻辑“与”，得到 μ 子触发信号 N1，然后再跟被测模块中的某两道“与”得到信号 N2。被测模块中的两道是模块同一层中相邻的两个 X 读出条，是闪烁体上下正对的

位置的两道。从而得到使用闪烁体和逻辑插件给出的效率：

$$eff = \frac{N2}{N1} \quad (4.2)$$

使用顶部一个模块和底部两个模块作为望远镜，进行三重符合作为触发信号，测量中间被测模块，我们叫自触发。使用模块自触发分析数据则是选择跟闪烁体面积有重合的小块（图 4.20），即使用长宽是 2×4 的小块作为望远镜的触发。闪烁体上下重叠面积为 $23 \text{ cm} \times 1 \text{ m}$ ，自触发的面积为 $52 \text{ cm} \times 1.04 \text{ m}$ 。

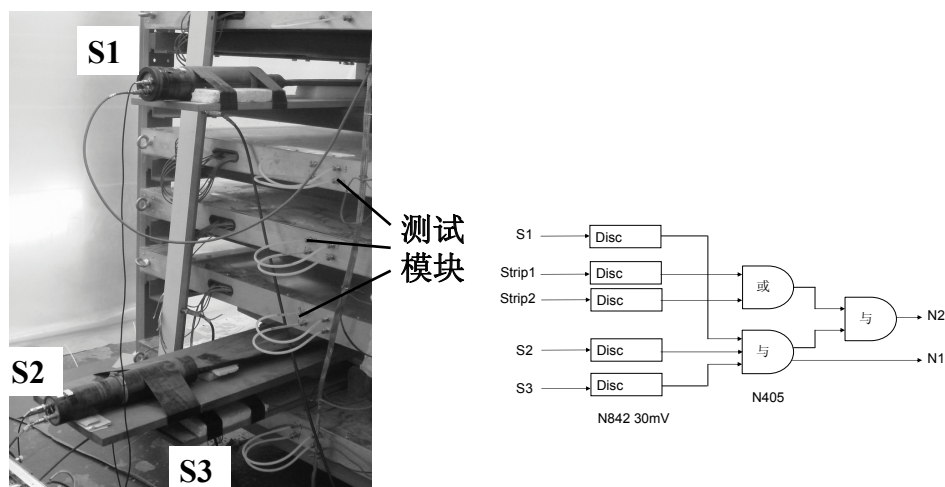


图 4.19: 闪烁体符合测量实验。左图是实验图，右图是逻辑关系图

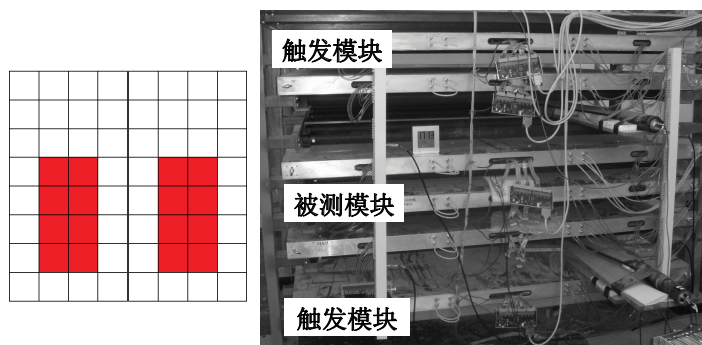


图 4.20: 模块自触发面积的选取

表 4.1 中给出一个模块的 1、4 层的左右两个位置的闪烁体触发效率和自触发效率。测试是在固定的高压、温度、流气速度下进行的。闪烁体触发的统计量是 14 k 事例数，误差大约是 0.39%，自触发是 120 k 事例数，误差大约是 0.28%。可见在误差范围内，符合的非常好。可以使用科大提供的电子学系统进行效率的测量。

位置	闪烁体	自触发
4层左效率(%)	96.4	96.4
4层右效率(%)	94.6	94.3
1层左效率(%)	97.2	97.2
1层右效率(%)	97.4	97.1

表 4.1: 闪烁体测量和自触发对比

4.2.4.2 外触发测量

后来在电子学板上增加了外触发的接口，也可以使用外触发来验证模块。使用三重符合的闪烁体作为外触发信号，输入到 USB-NIM 电子学板上，进行强制触发，收集前端电子学板 FEC 的数据，通过分析得到外触发效率。自触发是使用三个模块作为望远镜，测量中间被测模块。

实验中测量了编号 005 和 018 的两个模块。分析数据，得到表 4.2。可以看出自触发和外触发的数据基本相符，说明使用模块作为望远镜自触发得到的 trigger 信号基本是宇宙线 μ 信号，而不是电子学或者其他因素引起的。表中数据的差别来源有统计误差和模块区域性带来的误差。闪烁体比较小，上下符合计数率比较低。外触发得到的效率跟闪烁体位置和面积有关系，实验中将闪烁体放置在没有裸室边缘死区影响的区域，而且沿着模块内部读出条的方向。跟前一节闪烁体符合测量一样，正对面积是 23 cm $\times$ 1 m，自触发选择区域是中间 2 $\times$ 4 的小块。

模块	模块005		模块018	
触发模式	4选2	4选3	4选2	4选3
自触发	0.9981	0.9801	0.9986	0.9800
外触发	0.9963	0.9941	0.9969	0.9716

表 4.2: 自触发和外触发的对比

闪烁体符合测量和外触发测量两种方法证明了电子学系统和模块作为望远镜是没有问题的。

另外，从图 4.11 FEC 的工作原理中可知，FEC 收集的数据放在一个 32 位 8000 周期的缓存（buffer）里。同时，信号若符合 2/4 则通过 16 选 5 的形式（Local trigger 16 shot）发送指令到 USB-NIM，然后返回指令（cross trigger），到达FEC后对 buffer中往后16 个周期的数据采取“或”操作（Data 16 shot），然后进行打包上传。buffer

为 8000 个周期，而 cross trigger 过程也需要一定的电子学处理时间，这样 USB-NIM 在返回时候，必须进行触发延迟，才能找到最初的 2/4 信号在buffer 中的位置。这个触发延迟可以通过电子学的处理时间进行估算，但通过实验改变不同的延时进行效率测量可以给出最佳延时。

图 4.21 是测试过程中更改电子学的 USB-NIM 的触发延时（firmware 参数），得到 RPC 模块的效率变化。可以看出，高效率时延时范围在 16 个周期内，所以可以验证电子学是采用的 16 shot 数据处理逻辑。采取合适的触发延时，是效率的保证。实验中沿用科大给的结果，采用 7990，不过延时 7995 个周期是最理想的状态。

图 4.22 表示的是在不同的 Data shot 下效率的变化。不同的 Data shot 也会影响效率，在低 shot 下，效率低些，在高 shot 下，效率较高，在较高的 shot 下效率也不会再增加。说明 Data shot 时间窗口不能开太小，太小容易丢数。因为在 RPC 的时间晃动里，读出条本身是 8.4 m 长会造成 50 ns 的时间晃动，而电子学本身周期也会造成 50ns 的时间晃动，加起来已有 100 ns 的时间晃动，所以数据的寻找时间窗口不能太短，太短了会丢信息，也不能太长，太长了，噪音也会进来。实验中选取 16 shot 的 Data 处理逻辑。

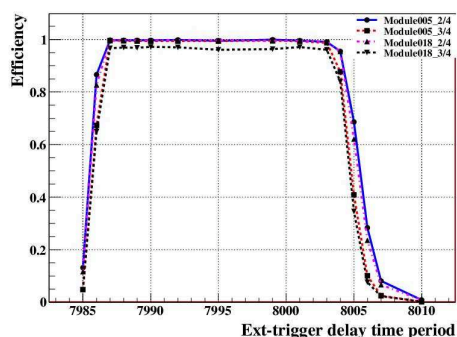


图 4.21: 触发延时和 RPC 效率对应的关系

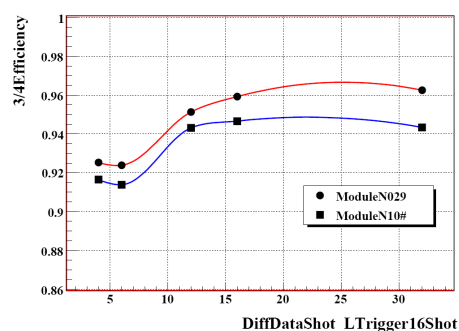


图 4.22: 不同的数据处理逻辑下效率的变化

4.2.5 振动测试

模块装配好、测量通过后，由北京运往 2000 公里外的大亚湾，由于路途遥远，铁路运输不方便，选择使用汽车运输。汽车运输虽然方便但是一个缺点是路上加速、减速、振动等比较剧烈，模块可能会因此受损，为此我们专门设计了模块的振动运输实验（图 4.23）。

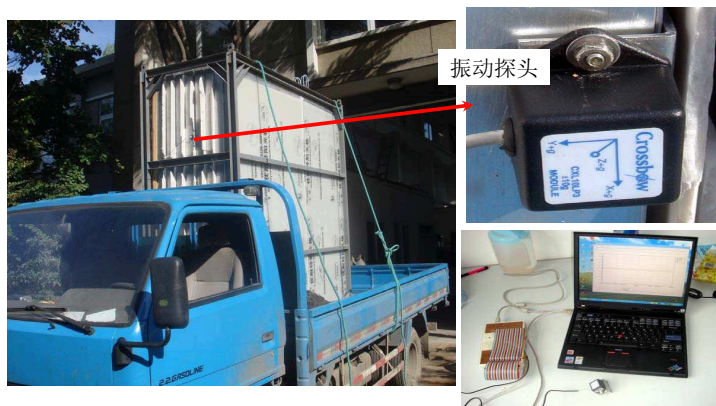


图 4.23: 模块振动实验

将 5 个模块装入往大亚湾运输要用的铁框里，在其中一个模块的边缘使用刚性结构安装上加速度探头。加速度测量探头为 Crossbow 的 CXL 10LP3，量程 $\pm 10g$ ，200 mV/g，供电电压 +5 V；12bit 模数转换，75 KHz 采样率。将整个铁框装入小卡车，在北京周边找比较差的路况，运输 200 km，并且在路途中进行几次有意的急刹车等操作，返回实验室后重新测量模块的性能。

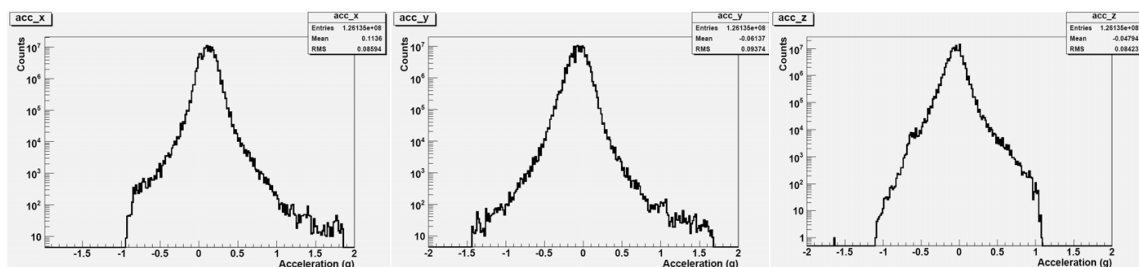


图 4.24: 振动三个方向的加速度

图 4.24 是在 15 kHz 取样率条件下，振动加速度的 XYZ 三个方向的分布。在驾驶员视角下，X 为向上，Y 为向左，Z 为向前。此结果显示在路途中最大的加速度不会超过 2 g。

返回实验室测量，检查裸室外表，没有发现异常；各个管脚的电阻，没有断路；各路气体流量正常，说明内部 RPC 裸室没有开裂。上电重新测量，5 个模块每

个小块前后 4 选 3 效率基本一致。图 4.25 给出的其中三个模块各自 64 小块效率的比较。证明这种模块的装配方案在运输上没有问题。

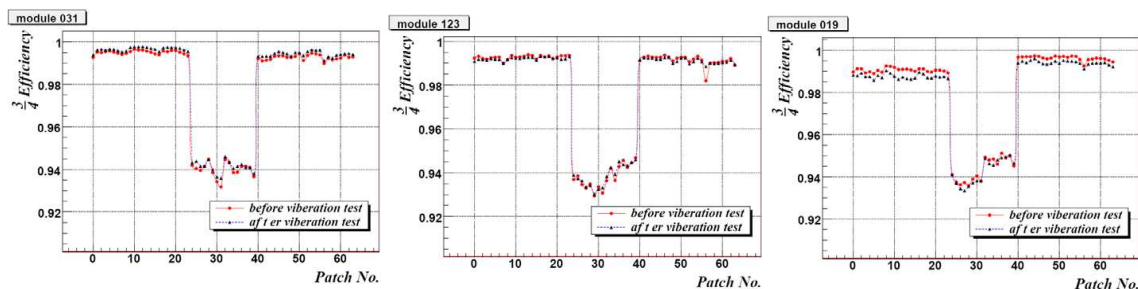


图 4.25: 模块振动前后 3/4 效率的比较

4.2.6 通气测试

考虑到模块测试时间比较紧张，每次通气需要等待约 1-2 天时间（5-6 个体积）才能测量。我们对通气进行了研究，掌握通气程度对探测器的影响，以节省测试时间。图 4.26 是两个模块分别在 300 sccm 和 800 sccm 流量下进行通气，在 7600 V 高压下，每个裸室的效率随着换气量的变化关系图。由于每个模块是上下两路气体平行供气，每路上串联 4 个裸室，这两组裸室效率的上升表现各自对应一致，在 800 sccm 快速通气时表现的更加明显，两组气路各自对应的裸室效率上升线基本重合，即 8 条曲线变成了 4 条。四条曲线不是同时上升的原因是 4 个裸室进行串联，工作气体（新气）先进入第一个裸室，进行换气，第一个裸室的旧气排入第二个裸室。第二个裸室没有及时更换新气，所以上升比较慢，最后的一个裸室，需要前面的裸室气体都排出后才能得到新气，所以效率上升最慢。

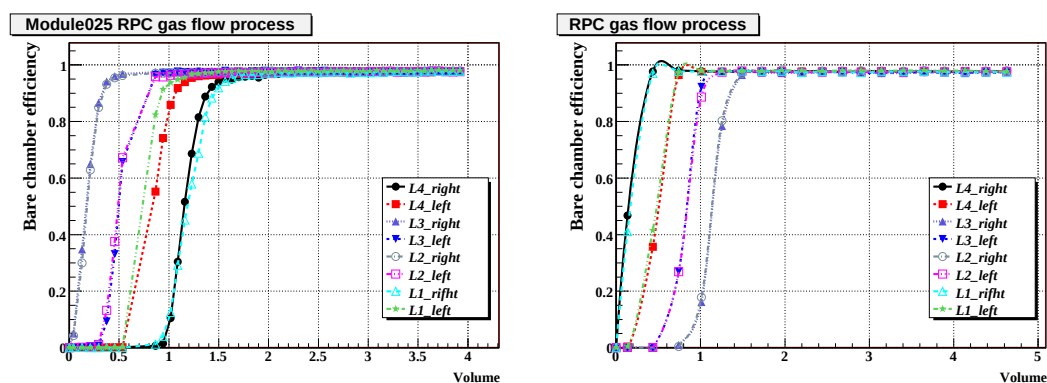


图 4.26: 模块025不同通气下效率变化

从图中可以看出，不管是 300 sccm 和 800 sccm，在换 2 个体积后，效率就会上

坪。但是 300 sccm 流速慢，上坪后效率稳定的时间较长，若要进行正式探测器取数测量，需要更换 3 个体积以后，而在 800 sccm 下，只需要 2 个体积就可以上坪。原因是 800 sccm 气流速度快，在流相同体积时，时间短，新旧气体来不及交换，新气体就将旧气体排挤走了。在 300 sccm 时候交换相同体积需要的时间长，新旧气体充分混合，上坪后稳定的较慢。所以，气体流速越小，不但更换相同体积本身所需要的时间越长，而且需要等待比较多的更换体积以后才能测量；反之，气流速度大，需要的时间越短，而且等待更换的体积数越小。正常情况下，在模块测试实验中开始通气的时候，开到 800 sccm 不需要再等待 5 个交换体积（1 天），2.5 个体积（半天）已经足够。

4.2.7 数据分析

在各方面验证正常以后，对电子学产生的原始数据，需要进行分析，得到我们想要的效率和研究模块的性能。实际上在前两节的电子学验证和通气测试的时候已经用到了电子学的数据进行了分析。这里进行详细的阐述。

高能所进行的模块测试实验是使用上下 3 个模块作为触发，中间为被测模块，而电子学设计上是 8 个 FEC 独立工作，只要一块 FEC 自己判断为 2/4 信号，就将 8 块 FEC 的信息全部输出到上位机（USB-NIM），然后再传到电脑上。电脑生成的文件为二进制格式，所以还需要进行数据的分析，得到我们想要的触发。

FEC 的数据格式为，一个事例的总长为 80 个字节（byte），每个模块为 10 个字节，其中前 2 个字节为数据头，1 个字节为通道，3 个字节为时间标签，4 个字节为 32 道的 hit 数据。同一事例在上传 8 个模块数据的时候先上传哪个是随机的。在处理数据的时候需要将数据按照通道跟实际的模块摆放位置对应起来进行排序。然后进行事例筛选。

4.2.7.1 事例选择的判选（cut）条件

我们的目的是选出好事例。所谓好事例就是事例各个标志位正常并且符合我们想要的三重触发的事例。所以在事例选择的时候需要进行一系列的事例检查和 cut 筛选。好事例的选择及效率的得出步骤如下：

1) 数据头检查。是判断 8 个模块的字头在各自的位置正确无误。

2) 通道检查。进行通道排序，并进行通道号的检查，8 个通道正确，不能缺少或者多出通道。

3) 时间标签检查。进行时间标签的判断，一个事例中时间标签全部相同，若有不同，此段数据不用。在上面三步都通过了，说明电子学没有传输上的逻辑错误，

就认为是一个事例的候选者，但是还不是真正的好事例。

4)每层着火数 cut。有些事例是模块内部的同一层，8道全着火，我们认为 shower μ 子，或者其他原因造成。这会让我们得到的测量效率偏大。我们需要使用单 μ 子的宇宙线进行符合测量。所以，选择好事例时，要求模块中只能是着火道数小于 8，即四层要求每层有小于两道着火，若不符合条件，此数据不要。

5)选出望远镜触发信号。将望远镜三个模块，每个模块的一三层进行“或”，即合并 1、3 层数据；然后三个模块进行“与”，即每个模块至少有 X 方向的读出条着火。同时要求符合后的 X 方向只有一条着火。同理选出 Y 方向的读出条，得到每模块至少一个 X 和一个 Y 读出条着火，即在模块对应位置确定只有一个小块着火。这样由望远镜就选择了一个干净的 μ 子事例。到此为止，就认为是一个好事例。

6)判选被测模块信号。之前的 cut 条件已经对事例挑的非常干净，在模块层数着火判选的时候，不再进行每层具体哪个通道着火判定，只数有几层着火，如果有两层及以上着火认为是一个 2/4 事例，如果有三层及以上着火认为是一个 3/4 事例。

7)计算出 2/4, 3/4 的效率：

$$2/4(3/4)\text{效率} = \frac{\text{第6步的2/4(3/4)事例数}}{\text{第5步的好事例数}} \quad (4.3)$$

4.2.7.2 阈值和高压的选择

进行模块测量首先要定的就是工作点，即模块工作高压和信号阈值。工作点的选择可由效率坪曲线定出。图 4.27 是测量得到的三个模块的高压和阈值 3/4 触发模式的效率坪曲线。

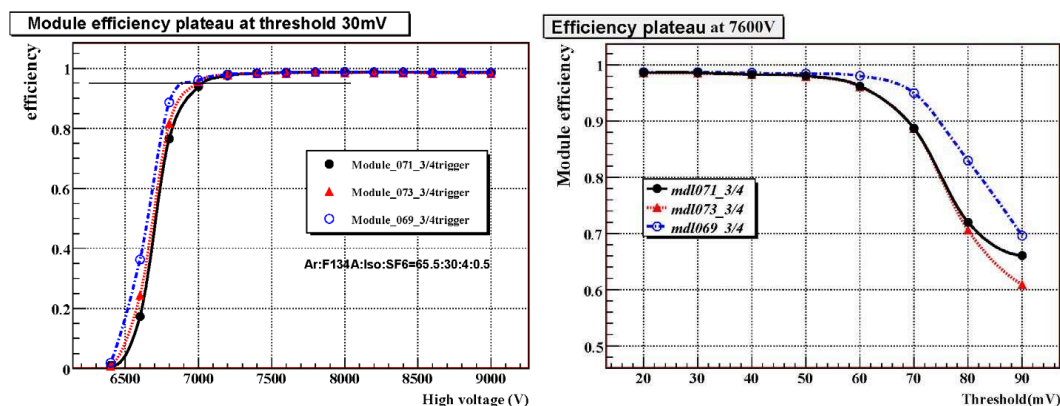


图 4.27: 模块效率坪曲线

可以看出模块在大亚湾气体比分下，高压到 7000 的时候就上坪，我们在坪上

7600 V 选取作为模块测试工作高压。这比大亚湾裸室测量 [72] 的上坪高压提前, 原因是气体比分不一样, 裸室测量使用 Ar: R134a: Isobutane = 53%: 43%: 4%, 模块使用大亚湾气体比分, Ar: R134a: isobutane: SF₆ = 65.5%: 30%: 4%: 0.5%。虽然多了 SF₆ 的猝灭, 但是多了百分之十几的 Ar。论文 [72] 详细研究了不同气体比分对阻性板室效率的影响, 从中知道在 7600 V 时候, 模块仍旧工作在流光模式, 没有达到放电模式。若选取 8000 V, 模块马上进入放电模式, 单计数和漏电流开始升高, 在放电模式下对 RPC 室损害较大。

信号工作阈值选择在 30 mV, 使用 4 选 3 的数据, 噪音符合可以忽略, 所以可以选择低一点的阈值。

4.2.7.3 小块效率分析与统计

大亚湾使用 RPC 来标记 μ 子, 还要使用每个小块来确定 μ 子位置, 小块的效率、性能、表现等各方面对将来的实验非常重要。

• 小块效率分析

我们在使用前面的好事例 cut 筛选后, 得到每个小块的效率, 如图 4.28。横坐标是小块的标号, 标号 0-7 对应图 4.29 中编号小块编号 (0, 0) – (0, 7), 以此类推。一个小块效率为图内一个点。

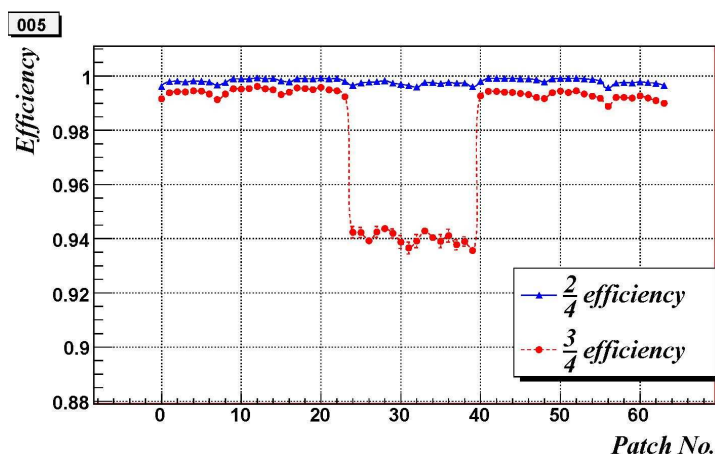


图 4.28: 单模块的小块效率。模块号是005。

可以看出, 模块各个小块的效率是有变化的。

首先 3/4 的效率, 在中间 16 个小块效率比其他小块低约 5%。这 16 个小块正好对应图 4.29 中间两列带死区的小块。通过下一章的模拟对比可以看出正是裸室中间拼接死区造成的。

其次可以看出在 2/4 情况下, 中间带死区小块的效率基本不受影响。这一点在

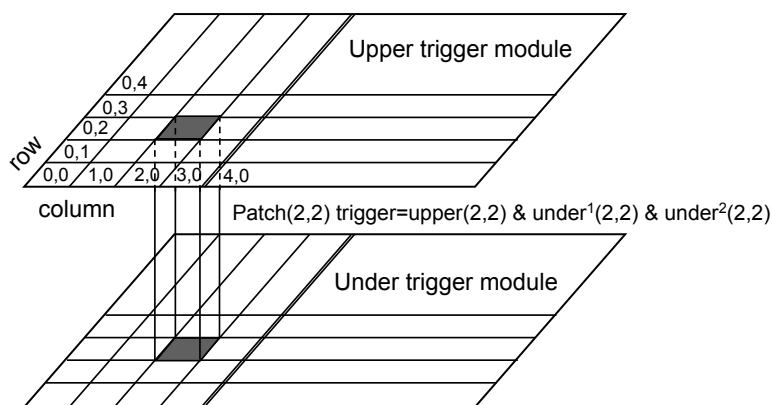


图 4.29: 64 个小块的排列分布示意图。(2,1) 意思代表第一排第二列的小块。

下一章也有验证。

从图中可以看出，小块效率还成规律性微起伏。可将这种周期性微起伏分为 8 组。这 8 组分别对应模块的 8 列小块。在 2/4 下，可以看出第 1、4、5、8 列效率整体效率低了 0.1%。这是由于这些列在边缘的缘故。读出条宽度是 26 cm，因为信号在流光模式下，流光比较大，其实能感应的信号面积宽度不只 26 cm。在中间的读出条，两侧能增加感应信号的面积，在边缘的读出条，只能一侧增加感应面积，所以感应面积稍微小了一点，效率有点降低。

还可以发现，在第 8 列的小块效率比第 1 列的稍微低了一点。这是由于前面对读出条单计数研究的时候，讨论的读出条摆放偏了 1 cm 造成的影响。不过这些效率的波动非常微小，不会影响大亚湾总的实验结果。

对模块小块的分析，可以推知整个探测器模块的装配状态，也是探测器生产测试过程中质量控制的保证。

• 小块效率统计

到目前为止，共测量合格的模块有 143 个，小块数量为 $64 \times 143 = 9152$ 个，其 2/4、3/4 效率统计如图 4.30。

可以看出 2/4 的效率为 99.8%，RMS 小于 0.2%，分布比较集中。小块 3/4 效率平均为 98.0%，统计图在 94% 附近有个堆积，这是由模块内部重叠死区造成的。除了低效率处的堆积，在高效率处效率平均值为 99.3%，RMS 为 0.3%，分布也比较集中。

4.2.8 模块效率统计

图 4.31 显示的是 143 个模块的效率统计，2/4 统计效率为 99.8%，RMS 约为 0.05%；3/4

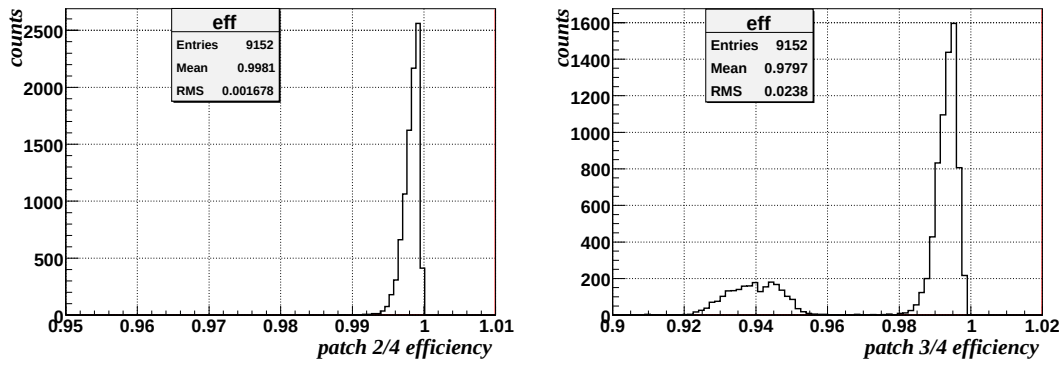


图 4.30: 小块 2/4、3/4 效率的统计。左图为小块 2/4 效率，右图为小块 3/4 效率

统计效率为 97.9%，RMS 约为 0.24%。

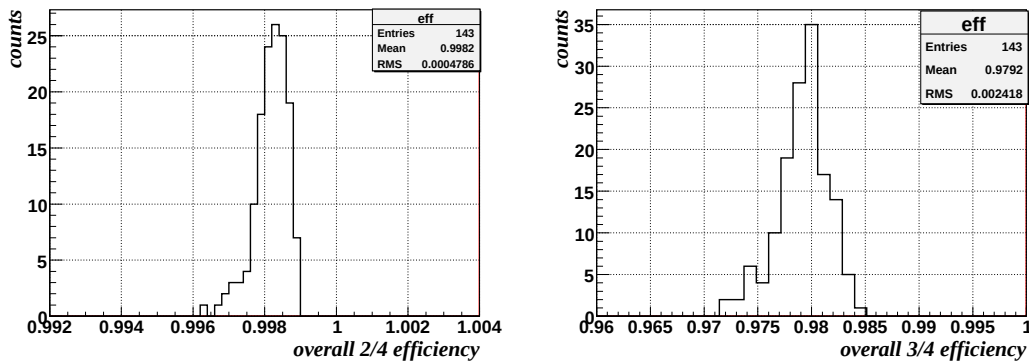


图 4.31: 模块 2/4、3/4 效率的统计。左图为模块 2/4 效率，右图为模块 3/4 效率

4.2.9 每道的计数统计

在模块测试过程中除了效率为首要关注点外，模块各道的 μ 子计数（Hit map）均匀性也作为评判模块合格的一个标准。数据分析中可以统计模块内部 32 道的每道计数大小，将 32 道中最大的一道的计数记为“1”，其余的跟这个来比。规定模块中 32 道中，不能有读出条计数小于最大计数的 60%。

这个规定一个目的是防止双计数（Double Counting）。如果出现两道读出连接到一块，则这两道的计数是其他道计数的 2 倍，这两道为 1，其他道接近 0.5。另外一个原因是，如果出现严重的高压打火，则也会出现个别道计数率较高，导致其他各道计数相对变低。

图 4.32 是 143 个合格的模块中，每个模块的 32 道读出条的 Hit map 统计。所以共 $143 \times 32 = 4576$ 个点。32 个读出条在模块中的对应关系是：0-7 读出条对应第一

层，8-15 读出条对应第二层，以此类推。每层的顺序是和图 4.16 一致的。

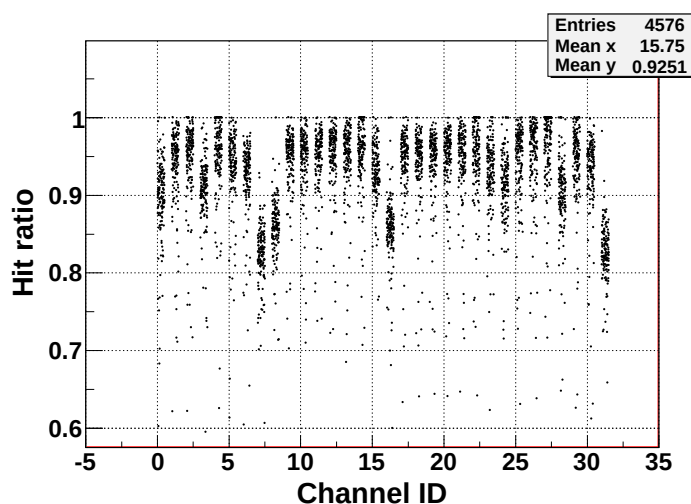


图 4.32: 模块的通道计数对比

从图中可以看出，图中有四个明显的道 7、8、16、31 计数总是比较低，这是因为前面讨论过的装配的四层读出条往右下错位 1 cm 的结果。每个读出条的宽度是 26 cm，边上读出条正对气体灵敏区宽度是 25 cm，如果将读出条平移 1 cm，则平移方向上的读出条所对应的宽度是 24 cm，缺少了 2 cm 的面积。所以计数就少了 $2/26 \approx 8\%$ 。即由原来的平均 0.92 降到 0.84 左右。

还可以看出 1、4 层（0-7，24-31）的计数各道是一致的，2、3 层（8-15，16-23）的计数也基本一致。4 层除了边上偏移的 4 道，另外边上 4 道 0、15、23、24 μ 子计数也有点低，这是因为边上有效面积小的原因。另外在第 1 层的第 4 道和第 4 层的第 5 道计数也有下降，这是中间缝的死区造成的。第 1 层左边是小室，右边是大室（参考图 3.12），中间缝靠左，故在第 4 道上。第 4 层左边是大室，右边是小室，中间缝靠右，故死区在第 5 道上。

4.2.10 实验环境参数的监测

实验中使用空调控制温度。在实验室两个点检测环境参数，一个点在支撑架的北侧工具架上，放置靠下一点的位置，另外一个点是在支撑架最上方模块南侧。图 4.33、4.34、4.35 是测量时候的温度、湿度和大气压参数统计。左图是测量时候的最大环境参数和最小环境参数的二维分布图，右图是将最大减去最小，填进直方图得到的结果。

可以看出，测量的最低平均温度在 20 度，最高温度平均在 23 度左右，所以平均温度在 21.5 度。因为要进行全年测量，虽然有空调控温，但是冬季和夏季温度也不

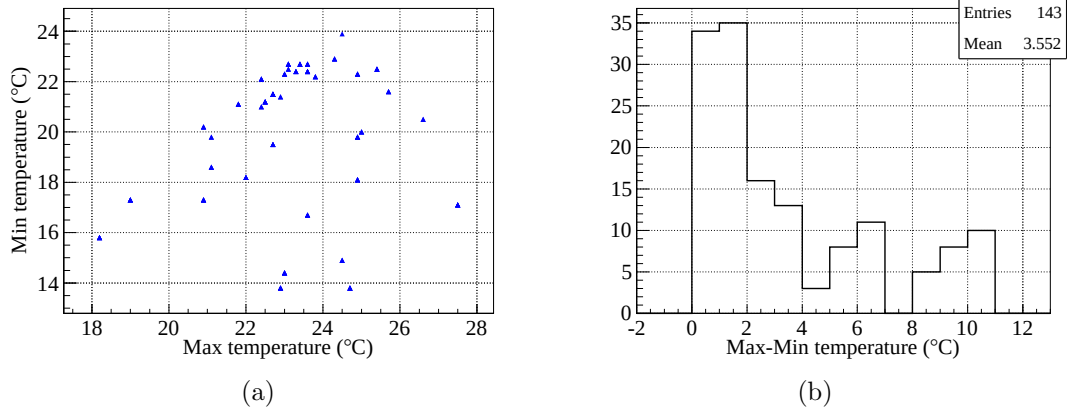


图 4.33: 温度参数统计

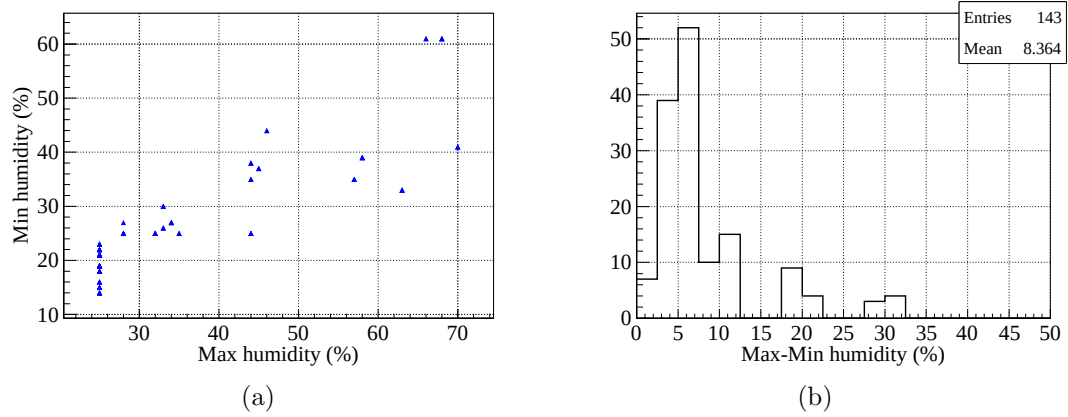


图 4.34: 湿度参数统计

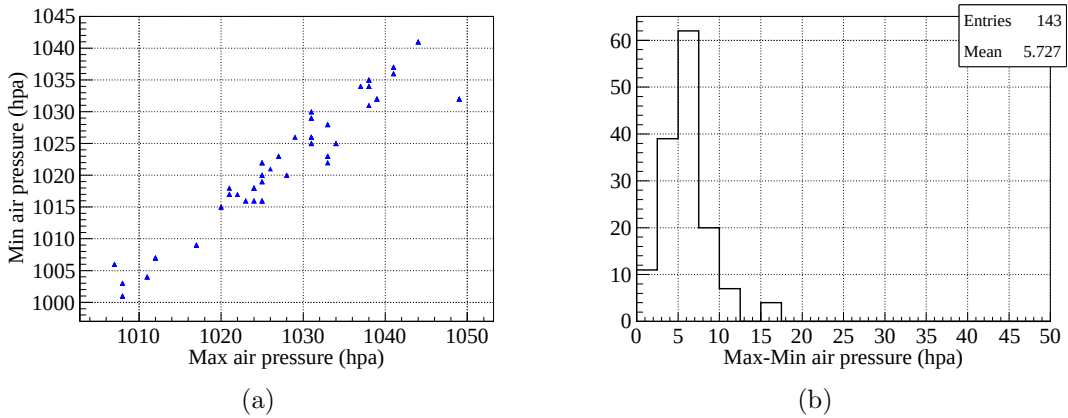


图 4.35: 大气压参数统计

太一样，温度范围除了两波比较偏的点，最大减最小温差平均在 2.5 度左右。

在湿度方面，最高和最低湿度基本成正相关，即最高湿度高的时候，最低湿度也高，二者的差的平均值为 8。平均湿度为 30% 左右。

在压强方面，可以看出压强的最高和最低分布也成正相关。平均压强在 1025 hpa 左右，二者之差的平均值在 5.7 左右，分布比较集中。

总的说来，测量过程中经过空调控温后的环境参数变化不是太大。

4.2.11 μ 子径迹长度跟效率的关系

在模块测量的实验中，8 个模块作为探测器实际上是等价的，但是在实验中发现使用相邻上下层的模块作为触发信号得到的效率，比使用最上和最下的模块做触发得到的效率要高。

为了弄清楚这个现象，在数据分析中选取某个被测模块中间的两块区域保持不动，然后选取上下触发的模块，保证 μ 子在一定的角度范围内同时穿过上下 4 重符合的小块的区域。通过这个方法得到 μ 子在气隙中穿过的径迹 (Track length) 和效率的关系图 (图 4.36)。径迹是 2 mm 的时候，是选取的上下正对的小块保证 μ 子垂直入射，同时选取最上的一个模块和最下的两个模块作为触发，以使入射角度范围限定在小范围之内。垂直 μ 子比较多，所以效率统计误差比较小。在大角的选取过程中，为了能得到比较大的径迹，在保证 μ 子入射被测小块不变的同时，作触发 (Trigger) 的模块也上下靠近选取，同时 μ 子角度误差就比较大。大角 μ 子数目比较少， μ 子的效率统计误差也比较大。

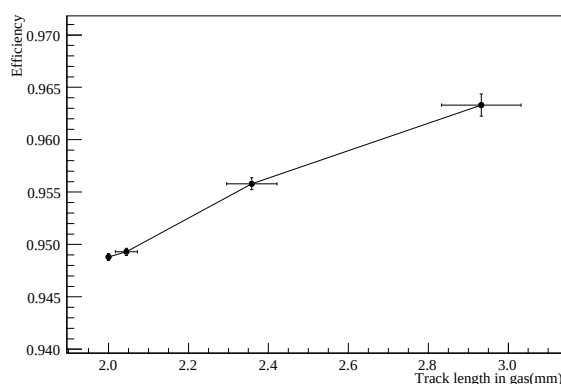


图 4.36: 工作气体下，RPC 效率跟 μ 子径迹长度的关系。

从图中可以得知，在垂直 μ 子入射的时候，即径迹为 2 mm，效率比较低，即 μ 子着火几率比较小。大角 μ 子穿过的时候，即 μ 子径迹在气体缝隙中比较长的时候，效率比较大，即 μ 子着火几率比较高。这就解释了选取临近触发为什么效率

会比较高。实验中计算对 μ 子的探测效率，我们使用的是临近触发的模式。即每次选取被测模块的上面一个临近模块和下面两个临近的模块作为望远镜。

4.2.12 模块在现场的检查测量

目前已经将测量合格的 16 框共 128 个模块运往大亚湾。图 4.37 中左边是在高能所装车出发时候的情景，右图为抵达大亚湾的状况。



图 4.37: 模块运往大亚湾

到达以后，需要在地面装配大厅（surface assemble building, SAB）进行检查模块中各管线的连接，保证合格后才能进入地下中微子实验大厅安装。

由于地面装配大厅没有完备的测试条件，而且阻性板探测器是经过各道工序检验后合格的产品，如果没有漏气和高压故障，探测器性能就不会变，所以没有必要再进行地面大厅的宇宙线测试，对密封性、高压、电阻三个方面的测试已经足够。

● 气密性测试

气密性测试使用 U 形测压计（manometer）测试模块气路的漏气情况。使用医用打气球往每个裸室中打气，气压加到 10 cm 水柱后等待 3-5 分钟，液面稳定了，记录此时液面差 h_1 ，一个小时（时间 t ）后再记录一次液面差 h_2 。根据两次液面差的变化，可以算出模块的漏气率（ L_r ），见公式 4.4。

$$L_r = (h_1 - h_2) / t / 100 \quad (4.4)$$

图 4.38 是经过计算后的 128 个模块每个模块的漏气率（体积/天）。可以看出有两个模块漏气率超过 5% 属于漏气，有 3 个模块漏气率是大于 2% 属于微漏。因为 U 形管的刻度的精度为 1 mm，由于读数误差造成的漏气率为 2%，所以判定大于 2 的为漏气。测试时是将模块中 8 个裸室串联，测到模块漏气，经检查实际上是其中的一个裸室漏气，加上微漏的，阻性板的漏气导致的损坏率为 $5 / (128 \times 8) \approx 0.5\%$ 。

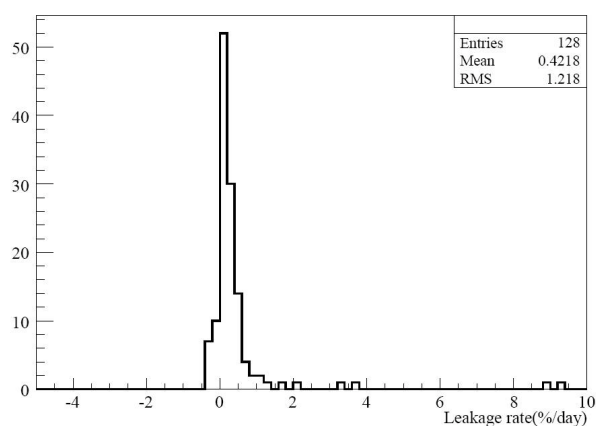


图 4.38: 模块漏气率统计

• 信号线连接测试

按照 RPC 探测器的结构，每层由一根 20 芯的扁平双绞电缆引出信号。中间的 8 对信号线连接到 8 道信号读出条和对应的信号地（读出条和信号地之间使用两个 27 欧的电阻匹配），两端的各一对信号线均连接到信号地，用来增强扁平双绞电缆传输信号的抗干扰能力。

由此，在 20 芯的扁平双绞电缆输出端，中间八对信号线对地间电阻约 14.5 欧，各接地的信号线间的电阻为零，与模块装配过程中检查方法一样。

依据这个标准，使用数字万用电表的欧姆档测量信号输出端每根线间的电阻就可以确定信号线连接是否正确。

128 个模块共 10240 道电阻管脚测量，结果为 4 道电阻的接地断线，2 道电阻测量值减半。不过接地断了不影响信号取数，因为电阻两端还连接 FEC 的取数电路，FEC 板也有接地。运输对电阻管线的损坏率为 $6/10240 \approx 0.06\%$ 。

• 高压线连接测试

出于安全考虑，SAB 大厅不允许使用大亚湾 RPC 探测器标准四组份的工作气体，为了有效地检测 RPC 探测器的高压线连接，我们给 RPC 通入纯氩气作为临时工作气体。在氩气存在下，给 RPC 裸室施加一定的高电压就可以输出较大的漏电流。通过测量各个 RPC 裸室的漏电流值，可以确定各路高压线的连接情况。并且，由于在高电压情况下，RPC 气隙中的氩气处在充分放电导通的状态，可以近似认为这个气隙层的电阻为零，那么由漏电流和电压值确定的直流电阻值就是 RPC 阻性板的电阻。由此可以计算到阻性板的体电阻率估计值。

图 4.40 为 1024 个裸室的漏电流值分布。由此可见所有裸室的高压线连接均正常。由漏电流值计算到 RPC 阻性板体电阻率分布见图 4.40。可见体电阻平均是

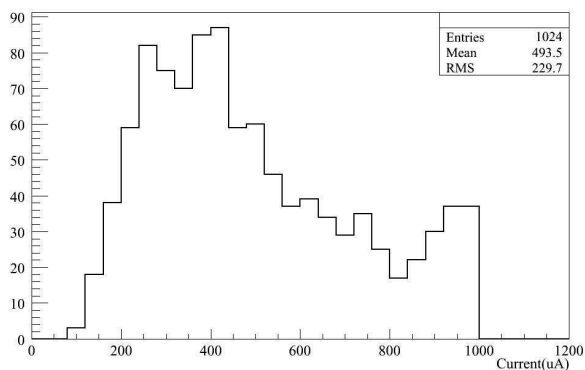


图 4.39: 纯氩、8000伏高压下裸室的漏电流统计。

$1.1 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ ，在阻性板测量的筛选范围 $0.5\text{-}2.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 之内，跟阻性板测量的结果 [72] 一致。

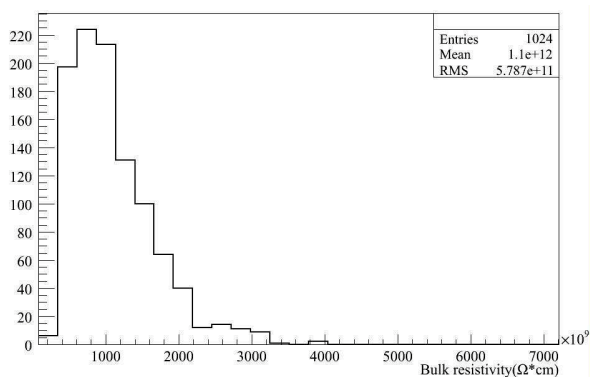


图 4.40: 纯氩、8000伏高压下裸室的体电阻统计。

• 纯氩信号

最后，我们用示波器查看了通纯氩情况下RPC模块的输出信号。图 4.41是两个信号道的信号形状。纯氩信号是十几微秒宽的典型信号，没有发现异常。

4.3 本章总结

本章介绍了大亚湾RPC探测器的测量过程、数据分析和测量结果。简述了在高能所搭建的模块测量系统。测量系统将RPC探测器的高压、气体、电子学及探测器本身等方面连成一个有机整体，能够进行正常的工作，特别是在电子学方面，进行了详细的验证。

对模块各方面进行了探测器性能的测量研究，如振动测试，信号单计数测试，

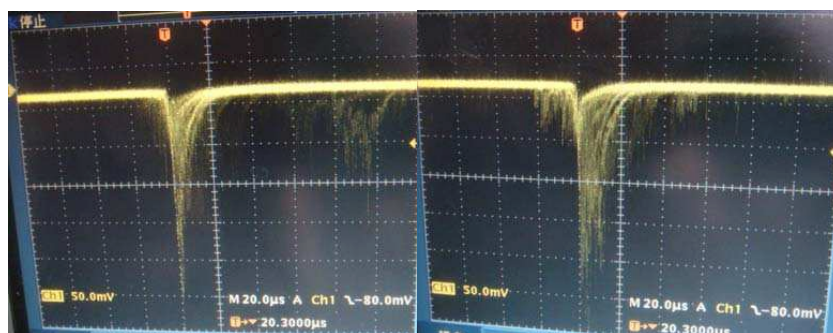


图 4.41: 纯氩、8000伏高压下信号波形。

相邻道的 cross talk，模块小块的效率，使对探测器有个全面的了解。振动测试验证了卡车运输的可行性。模块中，裸室边缘噪音计数率比较高，效率相对低了一点。相邻道的 cross talk 是 3%，非相邻道的 cross talk 值降低一个量级以上。模块中间带死区的小块的效率比不带死区的小块效率低 5% 左右。其他小块的效率比较高，但是也有一定规律的波动。

研究探测器的效率曲线和坪曲线，给出探测器工作点，给出物理方面模块质量控制标准，对模块进行筛选，目前为止共测量了 143 个合格的模块，对模块 2/4、3/4 效率进行了详细测量和统计，模块在 3/4 模式下平均效率约 98%，并分析了模块每道的计数的差异性。128 个模块已经运往大亚湾，在现场进行了气密性、电阻管脚、高压和信号等测试，结果良好。

第 5 章 RPC 探测器性能的模拟研究

大亚湾中微子实验将使用 RPC 模块摆放成地毯式阵列覆盖在水池上方，模块的各方面的性能设计，将直接影响到将来 RPC 系统对 μ 子的测量，以及 RPC 系统各方面的运行等。因此模块单元和模块单元间的重叠摆放等会直接影响 RPC 系统对 μ 子本底的测量效率。本章将对模块单元和由模块单元组成的地毯式阵列进行模拟方面的研究，从而估计大亚湾 RPC 探测器对本底的探测能力，全面理解和把握大亚湾实验的 RPC 探测器。

5.1 RPC 模拟平台

RPC 探测器的模拟是基于大亚湾自己开发的模拟软件 G4dyb [95, 96] 进行的。G4dyb 是基于 Geant4 建立的适合大亚湾的模拟平台，可以较容易的表达出探测器的几何形状，尤其是对于复杂的探测器。各种物理过程都有，使用起来方便快捷。但是目前为止还没有严格的理论来描述 RPC 流光模式下的工作原理。Geant4 中对 RPC 的模拟是只要 RPC 里有一定的气体并设定为灵敏区， μ 子穿过后就会留有 hit 信息，而实际测量中，不同的气体比分 μ 子产生信号的几率不同，两者之间不能完全表达，所以在模拟时候，输入探测器几何给出 hit 信息之后，再加上 RPC 裸室的效率，最后研究模块整体的性能。

在地面进行探测器模拟的时候（RPC 模块单元），我们使用修改后的 Gaisser 公式 [85] 得到地面 μ 子样本。修正后的公式在低能端与 Gaisser 公式相比有了压低，而且考虑了地球圆形的影响，与已有实验的数据对比 [97–101] 表明在不同的角度下，不同的能量下都符合的比较好，而且在低能情况下也能够服从 $\cos^2(\theta)$ [102] 分布（图 5.1）。可以看出修改后的 μ 子样本公式也可以较好地表示低能的地面 μ 子分布，所以修正公式在表达地表 μ 子流强方面具有显著的改进。

在进行大亚湾地下 μ 子模拟的时候（RPC 地毯式探测器阵列），需要使用地下的 μ 子样本，包括 μ 子的通量、角分布和正负比率。 μ 子的样本输入的精度会直接影响对本底模拟分析的结果的精度。

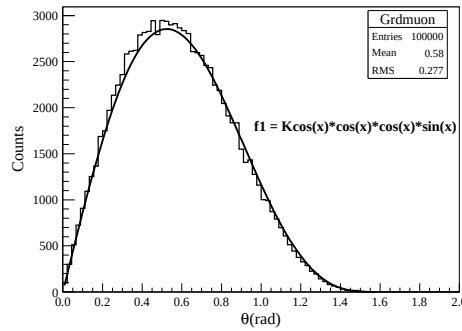


图 5.1: 修改后的Gaisser公式和低能地面 μ 子角分布对比。直方图为修改后的 Gaisser 公式按照平面探测器几何抽出的样本, 曲线是服从 $\cos^2(\theta)$ 的地面 μ 子按照平面探测器几何得到的理论曲线。

5.2 地下高精度 μ 子样本

大亚湾初期模拟研究使用的地下 μ 子样本 [85,103]是使用低精度地图得到的。本节研究包括使用了高精度地图, 扩充 μ 子角度, 加入实验大厅的影响等, 重新进行山形的 μ 子模拟, 得到了更高精度的地下 μ 子能量和角分布。

5.2.1 精确模拟地下 μ 子角分布

5.2.1.1 低精度 μ 产生子

在大亚湾中微子实验初步设计报告中, 使用的地下的 μ 子样本是关梦云修正后的地表 μ 子Gaisser公式 [85] 和大亚湾航拍地图 (老地图) 带入 MUSIC 模拟软件, 得到的结果。

老地图是以前的航拍地图, 精度低, 海拔高度不准确, 可能扭曲变形等, 而且老地图面积不是太大, 只有 $3 \times 4 \text{ km}^2$, 在计算大角 μ 子的时候不够精确, 在大亚湾前期的计算中, μ 子样本的 θ 角最大到 75 度, 在大角有缺失。使用 MUSIC 软件输运到最后, 在 μ 子能量大于两三百 MeV 的时候进行了 cut, 对低能的 μ 子有缺失。当时没有考虑地下的实验大厅的影响, 认为是一个点, 也没有考虑实验大厅真实的海拔影响, 直接使用海平面。 μ 子样本个数为 10^5 个, 不够多。

综合各方面考虑, 我们需要一个精确的地下 μ 子样本, 以使大亚湾的地下模拟更加准确。

5.2.1.2 使用高精度地图得到地下 μ 子角分布

- 高低精度地图合并

大亚湾实验组实地进行了测量，得到了更为精确的山形地图。但是人工测量的面积比较小，只是覆盖在大厅正上方，使用时候需要将新老地图对比进行合并。图 5.2 是将新地图（白色区域）往老地图的一部分上叠放示意图。

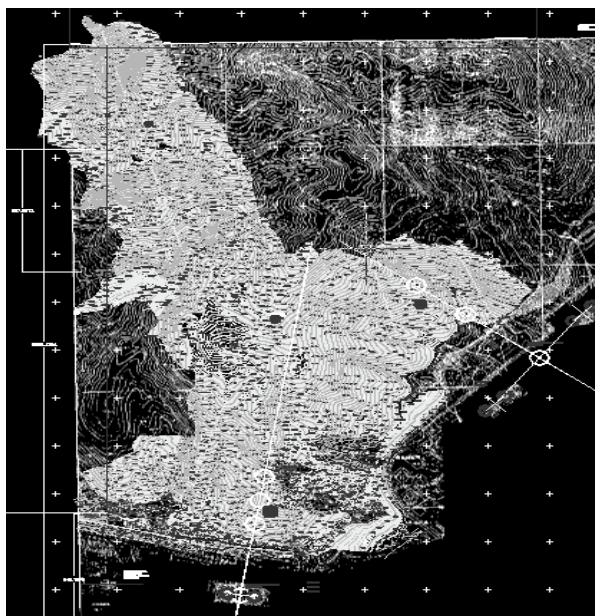


图 5.2: 高低精度地图合并

在合并的过程中，高低精度地图（新老地图）发现不容易全重叠上。于是在新老地图的拼合中采取了如下选择标准：

- 1) 新地图完全正确，移动老地图。
- 2) 山峰和山谷的等高线走向不会移动，不管是在哪个地图里面。
- 3) 靠近近点的两个核反应堆的位置在老地图里是和新地图重合的。

根据上面的标准，在新老地图的拼合过程中，使用两个核反应堆之间的中心作为重合点。进行老地图的缩放，旋转等操作，使各个山峰和主要部位都能重合。

结果将老地图逆时针旋转了 0.9184 度，放大了 1.0097 倍，整体将老地图降低了 10 m。降低 10 m 原因是，在大多数的典型点上，新地图都比老地图矮 10 m 左右（表 5.1）。在降低山形的时候，沿海的地方有个别点时候会是负值，如果出现负值，则认为海拔是 0 米。

在大亚湾的东部沿海去往 LA 核电站的路差异比较大，可能是后来将山开采，开发出来的路，认为人为因素比较大。不过包括三个实验大厅上方在内的大面积的山都是相差 10 米左右。

- 加入实验大厅的影响

位置点	Far点	DYB点	LA点	Peak1	Peak2	Peak3	东北部	西北部
老-新(m)	~9	~10	~10	9	11	10	10	11
位置点	南采石场	西采石场	东水塔旁	南水塔旁	办公室旁	食堂	DYB路	LA路
老-新(m)	~10	10	15	10	7	2	~10	44

表 5.1: 新老地图典型点高程差异表

实验大厅 (Experimental hall) 是空气, 跟岩石的密度相差甚远, 十几米高的实验大厅的影响也不能忽视。图 5.3 是将真实的实验大厅进行了简化, 放入模拟里的对比示意图。三个大厅做类似的简化。

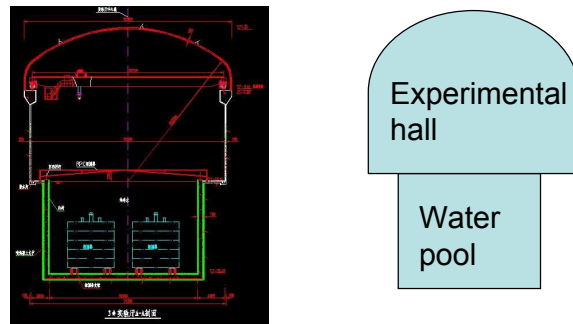


图 5.3: 实验大厅。左图是真实的大厅 [104], 右图是模拟输入的简化图

根据工程图知道, 大亚湾三个实验厅真实的海拔, 不是在水平面上, 各个点分别是, 近点 -20 m, 岭澳点 -16.62 m, 远点 -15.15 m [104]。这个真实的海拔也需要放入模拟中。

- 将地图扩充

老地图的大小是 $3 \text{ km} \times 4 \text{ km}$, 从图 5.4 中可以看出, 若将 μ 子的 θ 角增大到 75 度以上, 就必须增加远处排牙山的地图, 不然结果就不准确。

选用了美国航天飞机雷达探测 (SRTM, Space Shuttle Radar Topography Mission) 的低精度地图数据增加外围, 继续将地图扩展。SRTM 精度约为 3 角秒, 在赤道相当于 90 m。此数据使用的 WGS84 水平坐标系和 EGM96 垂直高程坐标系 [105]。而 googleEarth 也使用的 WGS84 坐标系, 所以可以找到大亚湾的近点反应堆, 通过近点反应堆的重合将 SRTM 数据和大亚湾的新老地图数据对起来。图 5.5 是 SRTM 数据和老地图的山形对比, 上面两图是老地图的得到的山形, 下面两图是 SRTM 数据得到的山形。可以看出虽然美国 SRTM 数据精度比较低, 不过在山形方面跟老地图是一致的, 验证了其数据的可靠性和可用性。

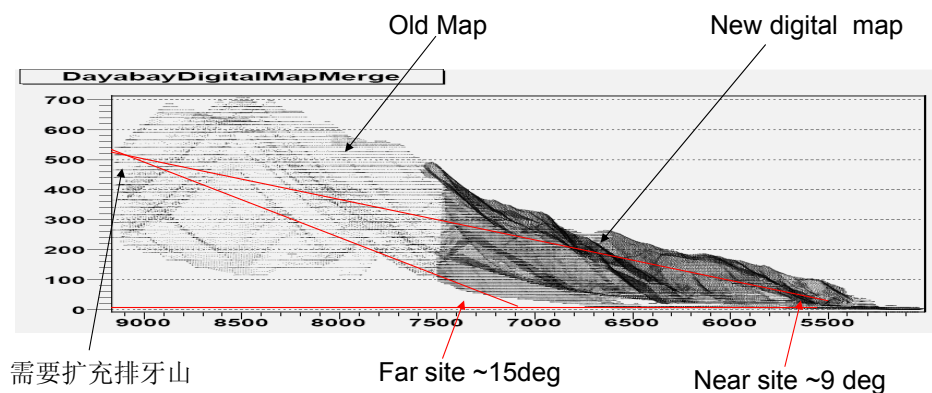


图 5.4: 扩充地图

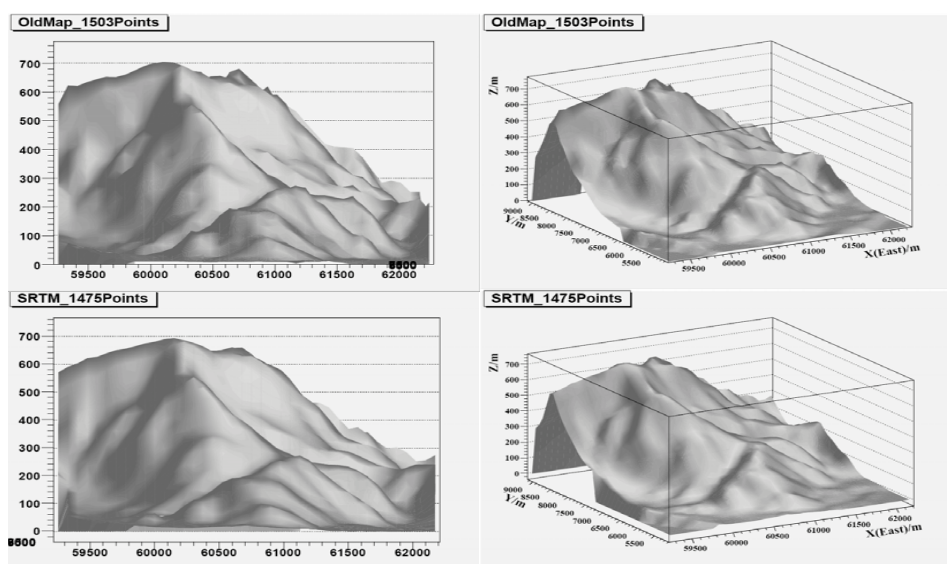


图 5.5: SRTM数据和老地图的山形对比

• 考虑椭圆地球老地图使用的模拟是假设实验点在海平面上，数据区域比较小。现在如果将实验点放入地下，又要考虑接近水平入射的 μ 子，地球的圆形效应不得不考虑。而WGS84 坐标系中使用的地球形状为椭球体，长短半轴差约 22 km，在地球半径上，如果按照圆计算，每 1 km 跟椭圆差约 3 m，所以在考虑大面积地形的时候，使用椭圆比较精确。

我们假设地球是椭圆球体，将近点核反应堆之间距离的中心定为坐标原点，使用平移矩阵和按照椭圆表面旋转的矩阵将地图数据不同点高程变换到相应不同表面的高程。图 5.6 左中给的是旋转后的结果。右图是最终取了 10 km 范围圆后的山形结果，也是最终模拟使用的地图。黑色比较集中的区域是高精度小地图，再往外是低

精度地图，最外面是 SRTM 更低精度的地图。

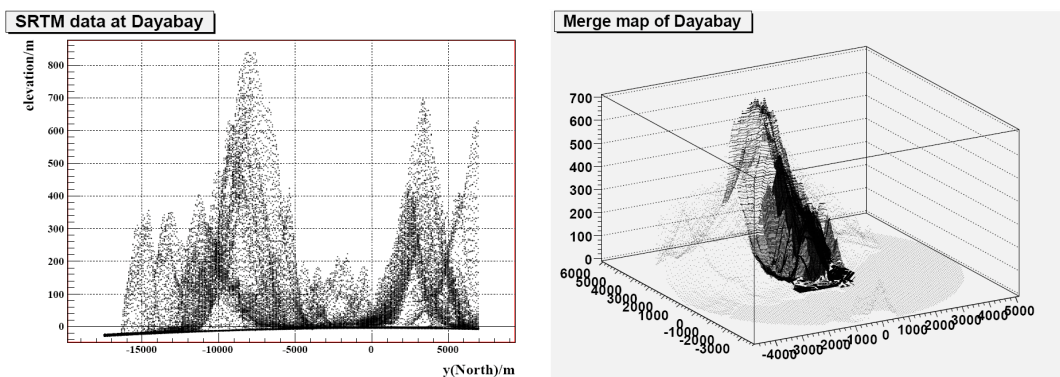


图 5.6: 不同地图数据合并后的结果。左图是考虑地球将 SRTM 数据旋转后的状态；右图是合并后取了直径 10 km 圆的地图

选取了半径 5 km 圆的原因是，在近厅海拔 -20 m， μ 子如果水平穿透地球，到达实验大厅需要在地下传输 16 km（图 5.7），若不考虑地球的影响，则这 16 km 就略为零。如果 μ 子角度是 89.79 度，只需要 5 km 半径范围的山体就够了。5 km 已经达到海边，海水的密度跟岩石也不一样，差别接近 3 倍，如果再扩充，还需要考虑海水的影响，简单起见，就只使用了 5 km 半径范围的地形，将 μ 子角度放到 89.79 度，再大其实使用修正后的 Gaisser 公式模拟也不准确。

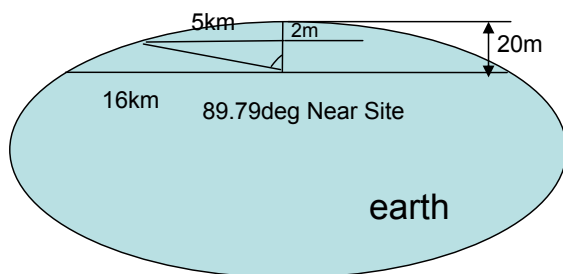


图 5.7: 椭圆地球的影响

• 得到地下 μ 子样本

综合上面多方面的考虑，最后输入 MUSIC 模拟的条件是：直径 10 km 范围的合并地图（SRTM + 老地图 + 新地图）； μ 子能量扩充，低能动能到 0，高能到 10 TeV； θ 角放大到 89.79 度；在实验大厅的地面产生 μ 子样本。

通过 MUSIC 模拟出来的结果见表 5.2，其中 OldMap 是大亚湾初期使用低精度地图模拟的结果 [85]，MergeAll 是新结果。新结果平均能量有所降低，但是 μ 子通量在远点增加了 $\sim 17\%$ ，在岭澳点增加了 $\sim 35\%$ ，在近点增加了 $\sim 6\%$ 。大亚湾以前模拟计算的本底也要增加大约这个比例。产生了 100 万个 μ 子样本，已经在大亚湾模拟

Site	Far		LA		DYB	
	Flux(Hz/m ²)	E(GeV)	Flux(Hz/m ²)	E(GeV)	Flux(Hz/m ²)	E(GeV)
OldMap	0.041	140.3	0.7	61.4	1.2	55.3
MergeAll	0.048	142.2	0.94	57.7	1.27	56.9

表 5.2: μ 子模拟结果

样本中使用。

高精度样本的角分布如图 5.8。跟低精度地图得到的结果来比 [85]，在 ϕ 角基本一致，在 θ 角方面，低精度地图将 θ 角 cut 在 75 度（图 5.9）。而高精度地图一直延伸到接近 90 度（图 5.8）。

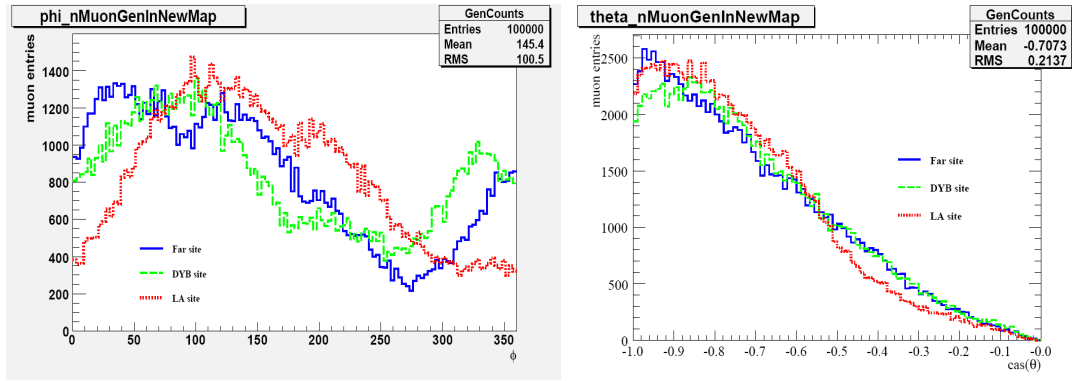
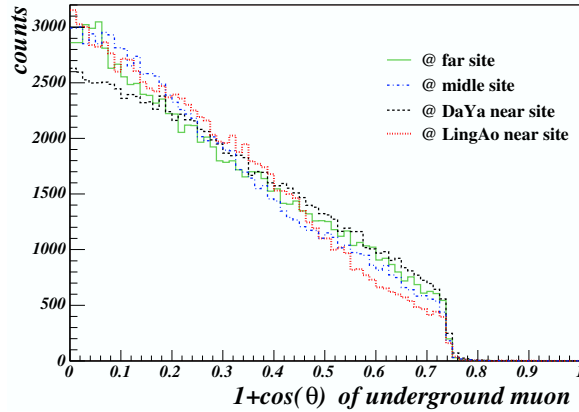
图 5.8: μ 子 θ 、 ϕ 角分布图 5.9: 以前的 μ 子 θ 角分布 [85]

图 5.10 是从 X 和 Y 两个角度看，新地图得到的 μ 子样本和老地图得到的 μ 子样

本的对比。可以看出每张图里两个直方图基本重合，大亚湾三个实验点上方的山形，新老地图来比，形状基本没有变化。

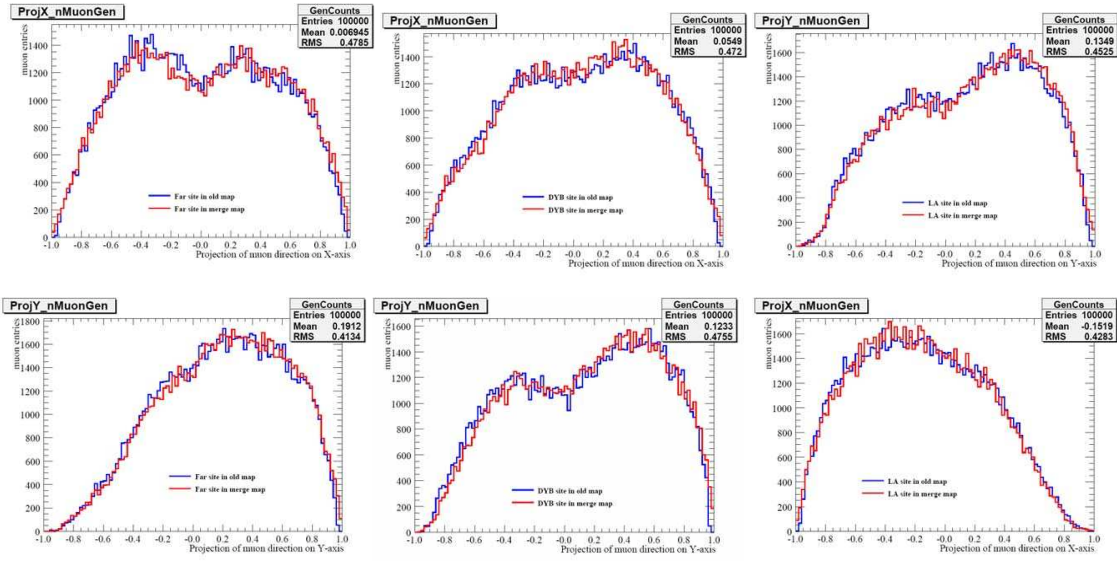


图 5.10: 各点新老地图 μ 子样本对比。

5.2.2 μ 子正负比 (Charge Ratio, μ^+/μ^-)

在大亚湾地下 μ 子正负比的输入方面，初期使用的是 CAPRICE97 实验 [106] 的结果。这段数据的 μ 子能量分布范围是 200 MeV - 120 GeV，覆盖的不全，而且模拟时候，在超出这个范围的低能和高能 μ 子的正负比简单的输入了 1.4。CAPRICE97 实验给出在 μ 子 200 MeV 的时候，正负比为 ~ 1.1 ，如果低于 200 MeV，正负比使用 1.4，那么这个突然的跳变，会影响专门对低能 μ 子进行的研究，例如对停止 (stop) μ 子的研究。

5.2.2.1 μ 子正负比的选取

对 μ 子正负比进行了更加广泛的调研。通过对比 CAPRICE94、CAPRICE97、CAPRICE98、MINOS、L3C、Iran、MUTRON 等各自对 μ 子正负比测量的实验 [106–113]，筛选适合大亚湾使用的 μ 子数据，在 μ 子不同的能段采用了不同实验数据。0.2~30 GeV 范围内选取了 CAPRICE94 [106] 的数据，因为 CAPRICE97 的数据实际上不是海平面的，是 1270 米高空的数据。在 30 GeV/c $\sim$ 5 TeV/c 选用了 MINOS 的数据 [107]。在能量 0.112 $\sim$ 0.2 GeV 区域选取了伊朗的一个实验 [108]。在 0.2 GeV， μ 子的正负比为 1.21，这与 CAPRICE94 数据在 0.2 GeV 正好能够衔接上。使

用这三个实验的数据点，然后使用 MINOS 的 πk 模型进行拟合（图 5.11）。得到拟合参数的值为 $f_\pi = 0.5505$, $f_k = 0.6745$ 。

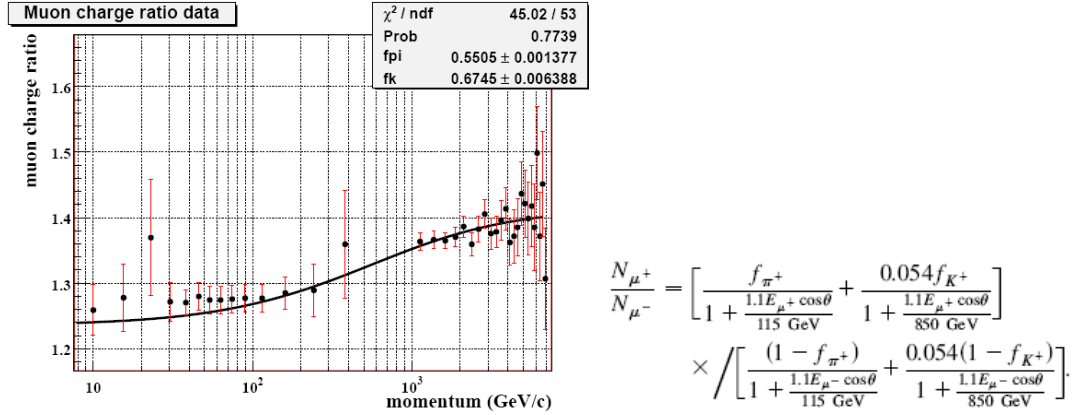


图 5.11: πk 模型。右图是 πk 模型，左图是拟合的结果。

拟合给出在低能端， μ 子正负比为 1.24。这个跟 Iran 的实验比较符合。随着能量的升高， μ 子正负比值慢慢升高，在 7 TeV 以上 μ 子正负比才达到 1.4。所以大亚湾前期的模拟不能粗略的将正负比在高低能量范围统一定为 1.4。这个拟合的结果也已经应用到大亚湾的模拟中。

5.2.2.2 测量 μ 子正负比的一个方法

上一小节我们知道，国际上许多实验测量了不同能区范围的 μ 子电荷正负比。大亚湾中微子实验利用掺 Gd 液闪作为反中微子探测器（AD）来探测中微子反应的中子和电子信号，所以 AD 在探测电子、中子方面是一个非常灵敏的探测器。stop μ 子产生的正负电子和中子，AD 同样也能够较灵敏的探测到。基于这个出发点，并根据正负 μ 子 stop 后表现出来的行为不同（下面详细讲解），提出了在大亚湾一个测量 μ 子电荷正负比的方法。

在大亚湾实验中，David 等人也提出了使用文章 [114] 的一个通过测量 μ 子的平均寿命测量正负比的一个方法 [115]。虽然 μ^+ 、 μ^- 的寿命在 C 和 Gd 上不同，但是相差不大，也是不容易区分，最后靠拟合来给出结果，测量比较困难。我们的方法是直接在 AD 里数中子的个数，并利用其他实验上给出的 μ^- 在不同原子核上的俘获几率值 [116]，误差在 3%。根据大亚湾液闪比分（精度为 0.1%），算出在大亚湾液闪中 μ^- 放中子的几率，从而算出总的 μ^- 个数，通过反符合系统知道总的 stop μ 子个数，最后就可以算出 μ 子正负比。

• 大亚湾 stop μ 子能量的范围

μ 子 stop 在 AD 里，能被探测到信号的范围是直径 4 m 的外有机玻璃罐（OAV，

outer acrylic vessel) 以内, 那么距离水池表面的距离是 2.5 m 水 + 0.5 m 油 = 3 m。所以垂直 μ 子打下去 stop 的距离范围是 3-7 m。如果倾斜的 μ 子打下去, stop 在 OAV 内的 μ 子需要的能量就更大。假设 μ 子的能损是 $\sim 2 \text{ MeV/cm}$, 那么就需要在大厅的初始能量在 1-2 GeV 范围之内。图 5.12 给的是模拟得到的在 AD 里 stop μ 子的初始能量分布, 平均能量在 1.4 GeV。

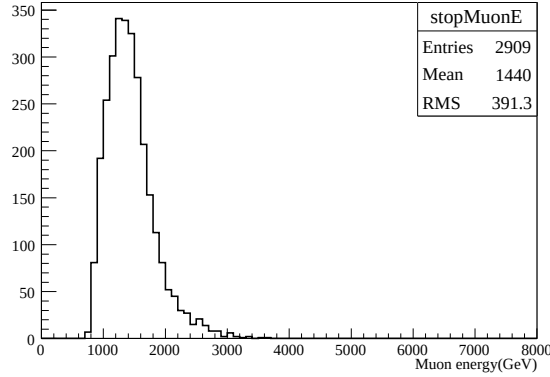


图 5.12: stop μ 子在大厅的初始能量

• μ 子正负比的测量

μ^+ stop 后衰变成正电子 (方程 5.1)。 μ^- stop 后被原子核俘获, 然后很快通过发射 Auger 电子 (方程 5.2), 退激 (cascade) 到 1S 的态, 叫 Auger 效应。正负电子的能谱一样, 实验中不能区分开, 我们都叫其为衰变电子。 μ^- 还能将原子核的中子踢出 (kick out) 或将原子核撕裂, 叫瞬时分裂 (prompt fission) [117]。当 μ^- 被原子核俘获时候, 不同的原子核有不同的发射中子的几率。这里给出 μ^- 被俘获产生中子的公式 5.3。中子产生出来后, 被掺 Gd 液闪俘获, 放出 γ , 最能被探测器探测到。

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \tilde{\nu}_\mu \quad (5.1)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \mu^- + N &\rightarrow N' + n + \nu_\mu \\ n + Gd &\rightarrow Gd' + n\gamma \end{aligned} \quad (5.3)$$

表 5.3 是 μ^- 俘获后发射中子的几率, 来自参考文献 [117]。Geant4 的 Monte Carlo 模拟也是参考这篇文献, 这个数据来自 [118]。

nucleus	C	O	H	Fe
Capture rate	7.7%	18%	10^{-5}	91%

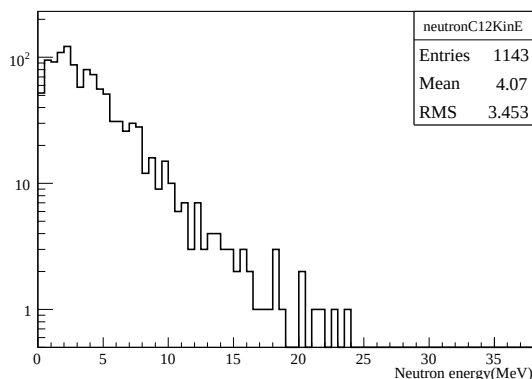
表 5.3: μ^- 在不同核上俘获产生中子的几率图 5.13: μ^- 在 C_{12} 上被俘获发射的中子谱

图 5.14 是从 Geant4.8 中得到的 μ^- 在 ^{12}C 上被俘获发射的中子能谱。

因为大亚湾的液闪和掺Gd液闪内的 C、H、O、Gd 的精确质量百分比是知道的，C: H: N: O: Gd= 0.8535: 0.1288: 0.003: 0.0164: 0.001，将来的误差为 0.1%。结合表 5.3 给出来的值就能得到在液闪中 μ^- stop 产生中子占 μ^- stop 总数的百分比。经计算，这个值为 0.061。

表 5.4 是模拟给出的，总的 μ 子stop 的数量等。因为 μ^- 在 H 上俘获的几率比较小，Gd 占的比分也比较小，这里没有列出。将来实验可以通过时间 cut 测量释放中子的数量，得到释放中子的 μ^- 数量，类似于模拟输出的 $431+12 = 443$ 个。再根据前人实验数据和液闪比分得到的 μ^- 在大亚湾液闪中的俘获比 0.061，反推得到总的 μ^- 数量为 $(431+12)/0.061 \approx 7426$ 。

总 μ stop 数	μ^- stop 数	μ^- 在 C 上俘获数	μ^- 在 O 上俘获数
16957	7459	431	12

表 5.4: 模拟得到 μ 的俘获数量

根据反符合测到的总的 stop μ 子数量（这里假设就是模拟的输入 16957），就可以算出 μ 子的正负比（见方程 5.4）。

$$\begin{aligned}
 R_{\mu^+/\mu^-} &= \frac{N_{total} - N_{\mu^-}}{N_{\mu^-}} \\
 &= \frac{16957 - 7426}{7426} \\
 &= 1.28
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

而模拟实际输入为 1.24。模拟结果符合输入，只是由于统计量不够，误差比较大。将来实验在统计量方面，每个 AD 每年的俘获 μ^- 并放中子的数量为 $\sim 10^5$ - 10^6 ，两个 AD 总数量会加倍，所以统计方面不成问题。

在公式 5.4 中，总的 stop μ 子数量需要知道。总 stop 数可以由两种方法得到，一种是通过水池和 RPC 反符合系统测量得到。当 μ 子 stop 在 AD 时候， μ 子的径迹只在 AD 上方有径迹，下方没有径迹，在水池里穿过的径迹至少 2.5 m，这么长的径迹，水池对其的探测效率几乎是 100%。通过反符合系统可以给出统计。另外一种方法是通过 μ^- 和 μ^+ 的衰变电子（decay electron）得到。图 5.14(b)是使用大亚湾的模拟混合数据对 μ 主信号之后 cut 1-10 us 得到的衰变电子谱，跟图 5.14(a) super-K 测量的电子能谱一致，可以看出衰变电子的能量平均为几十 MeV，大于中子在 Gd 上俘获的信号，实验上会比较容易测量。大亚湾实验也可以测量衰变电子谱。衰变电子的数量就是 stop 产生电子的 μ^+ 和 μ^- 的数量，再加上之前得到的 μ^- 被俘获产生中子的数量，就是总数量。两种方法得到的数量也可以相互 check。

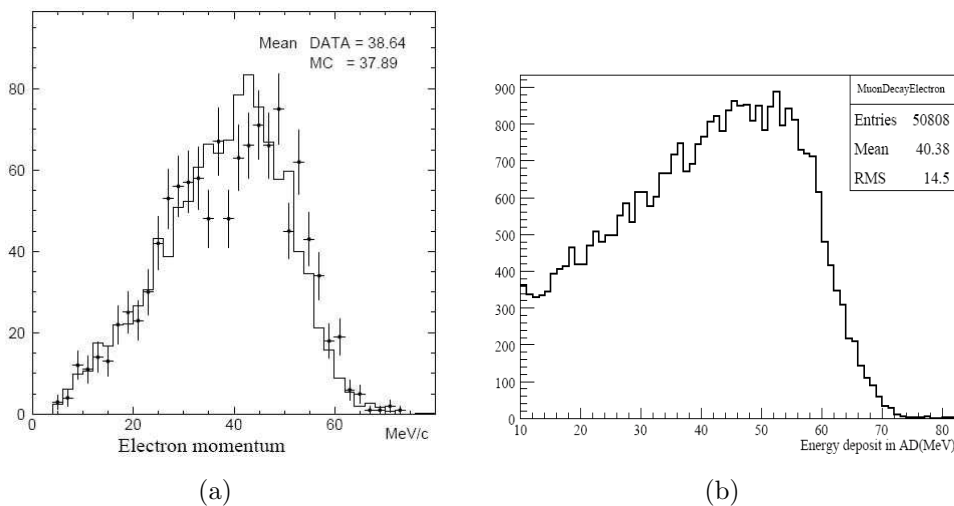


图 5.14: 衰变电子谱。(a)是 Super-K 测量的衰变电子谱，(b)是在大亚湾模拟混合数据中对 μ 信号之后 cut 1-10 us 得到的衰变电子谱。

在 高能所的小水箱模型实验中可以清晰的看到衰变电子波形，如图 5.15 左。右图是拟合的衰变电子距离主信号 μ 子的时间，拟合出来 ~ 2.1 us，是 μ 子的寿命。

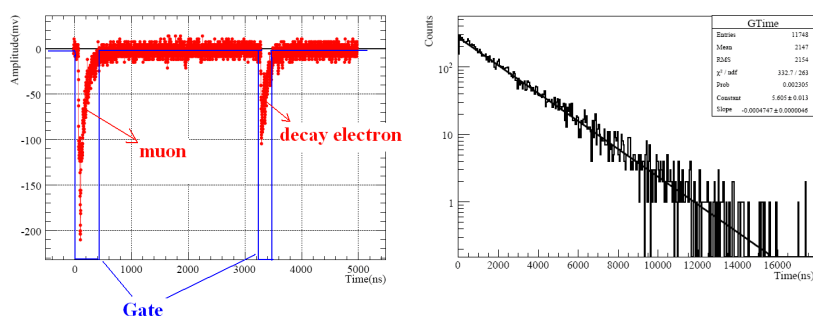


图 5.15: 衰变电子信号。左图是在水箱实验中看到的衰变电子信号，右图是在模拟得到的衰变电子时间距离主信号时间

• 高能刻度源

我们也可以使用 μ^- stop μ 子做物理方面的研究，像 μ^- stop 的物理过程研究，Geant4 的模拟参数，中子的产生和俘获过程，衰变电子等。stop μ 子产生的电子谱是固定的，也可以使用它做能量刻度。大亚湾只有低能的刻度源，像中子源，低能电子源。在低能方面没有刻度源，而衰变电子谱的平均能量在几十 MeV，正好相当于一个高能刻度源，在高能量方面进行刻度，研究除了中微子能量范围之外的高能物理事例。

5.3 单元模块的模拟计算

本节使用地表 μ 子产生子，对模块进行模拟研究，和上一章测量的数据对比，以更好的理解探测器模块的性能。

在模块的设计时候，简单计算了模块内部不同层 RPC 交错叠放时模块的效率。现在在读出条确定使用 26 cm 宽，模块使用二维读出以后，每个模块就相当与被分为了 $8 \times 8 = 64$ 个小块 (patch/pixel)。将来大亚湾实验需要使用 RPC 模块的小块来确定 μ 子击中位置，所以通过模拟模块中 64 个小块进行了细致的研究。

模块内部裸室交错叠放 (图 3.12)，目的是来减小死区对整个模块的影响，但是死区的影响不可能完全避免。在模块 64 个小块效率的对比中会更加明显 (图 4.28)。裸室的交错重叠，64 个小块按照 $26 \times 26 \text{ cm}^2$ 等面积排列 (图 4.29)，带死区的小块正好落在第四列和第五列里。我们可以通过模拟来看死区对这些小块的影响。

RPC 模块的几何输入模拟程序，尽可能按照真实几何的尺寸输入，气体灵敏区按照读出条大小输入，进行 10^7 个 μ 子模拟计算。

因为死区在各个小块 (第 4、5 两列) 中是一样的，所以带死区的各个小块的效

率都一样。表 5.5 是模拟计算得到不同裸室效率下，带死区的一个小块的效率。当裸室效率为 96% 时，小块 2/4 效率为 99.57%，3/4 效率为 93.44%。而在没有死区的理想状态下，使用公式 3.3 可得 2/4 效率为 99.97%，3/4 效率为 99.09%。理想状态可以看做是不带死区的小块，可以看出，在 2/4 效率下，差别较小，而在 3/4 效率下相差较大，有死区的小块要比没有死区的小块效率低 $\sim 5\%$ 。所以模块 64 个小块中，中间第四、五列的 16 个小块的效率比其他低 $\sim 5\%$ 。这与前面模块实验测量的结果（图 4.28）符合。

Chamber eff.(%)	92	94	95	96	98	100
小块2/4 eff.(%)	98.93	99.28	99.43	99.57	99.80	100.00
小块3/4 eff.(%)	90.21	91.97	92.75	93.44	94.58	95.38

表 5.5: 不同裸室效率下带死区的小块的效率

同样也可以得到模块的效率。表 5.6 表示在不同裸室效率下，模块单元的效率。可以看出在裸室效率为 96% 时候，模块单元的 2/4 效率为 99.89%，3/4 效率为 97.79%。

Chamber eff.(%)	92	94	95	96	98	100
Module 2/4 eff.(%)	99.61	99.77	99.83	99.89	99.95	100.00
Module 3/4 eff.(%)	95.11	96.66	97.25	97.79	98.57	98.93

表 5.6: 不同裸室效率模块单元的效率

根据前面的模块测量统计结果，2/4 统计效率为 99.8%，3/4 统计效率为 97.9%，这个情况下裸室的平均效率应该在 96% 以上。而对大亚湾 RPC 整体效率模拟得知当单个裸室的效率在 96% 的时候，模块的整体效率可达 97% 以上，符合大亚湾 90-95% 的整体效率的要求 [30]。效率低的小块效率也在这个统计范围之内，所以虽然有低小块效率的存在，但仍然能够满足大亚湾的要求。

此外还对模块不同层的不同效率进行了模拟，研究不同效率的裸室装配到同一个模块里，所能达到整体效果。这个研究可以应用于模块装配过程中将效率稍微低一点 RPC 室（按照裸室测量规定为不合格）配合高效率的 RPC 室进行装配，达到具有相同要求的同时节省资金的目的。

表 5.7 给出在不同层不同效率下，模块中间有死区和无死区的 3/4 效率。中间无死区效率为模块中间假设没有拼接死区的时候得到的效率，这是理想状况，跟理论计算结果相符合。中间 2.4 cm 死区为假设模块中间有 2.4 cm 拼接死区，实际两块裸

第1层(%)	第2层(%)	第3层(%)	第4层(%)	中间无死区(%)	中间2.4cm死区(%)
95	95	95	95	98.58	97.25
95	95	96	94	98.58	97.26
95	96	96	93	98.61	97.28
95	97	94	94	98.61	97.27
96	96	94	94	98.59	97.26
95.9	95.9	95.9	95.9	99.02	97.76
97.0	96.8	96.8	93.0	99.09	97.81

表 5.7: 高低效率裸室组合得到模块单元的效率

室每块边缘有 ~ 1 cm 死区，加上边缘高压绝缘的包装，经过测量中间大约为 2.4 cm 死区。可以看出将高低效率的裸室组合在一起得到的模块效率，跟第一组全是 95% 的结果基本一致，所以可以将低效率（甚至低到 93%）的裸室配合装到同一个模块中。另外，从表格最后两列的对比可知，中间死区会将模块效率降低约 1.3%。

5.4 RPC 地毯式阵列的模拟和性能的研究

通常说的大亚湾 RPC 探测器的效率，不是指单个裸室的效率，也不是指单个模块的效率，而是多个模块在各个实验点组成 RPC 地毯式阵列后各个实验点的 RPC 系统的整体效率。模块间的重叠虽然可以像模块内部一样，通过重叠来降低死区带来的非效率（inefficiency）。但是死区的影响不能完全消除，在重叠 10 cm 时模块的整体效率比单个模块效率低了多少？在什么水平？低了以后还能不能满足 RPC 系统效率 90-95% 的最初要求？怎么拿现有的模块单元来优化，提高整体效率？这些将是本节讨论的问题。

5.4.1 模块间的重叠

为了减小模块摆放时候的死区影响，共提出了三种不同的模块摆放模式（图 5.16）。对于 CC 模式（CC-mode），做成模块平面二维摆放，中间每个模块都与四周的重叠，需要的高度是 4 个模块的高度。对于 LD 模式，需要 5 个模块的高度。一般如果实现每个模块四周都有重叠，高度越高，带来的死区越大。对于 ST 模式，实现了重叠，同时高度最低。这种斜插的模式也比较容易操作。本文对这种模式下带来的 μ 子探测效果进行了系统的模拟。

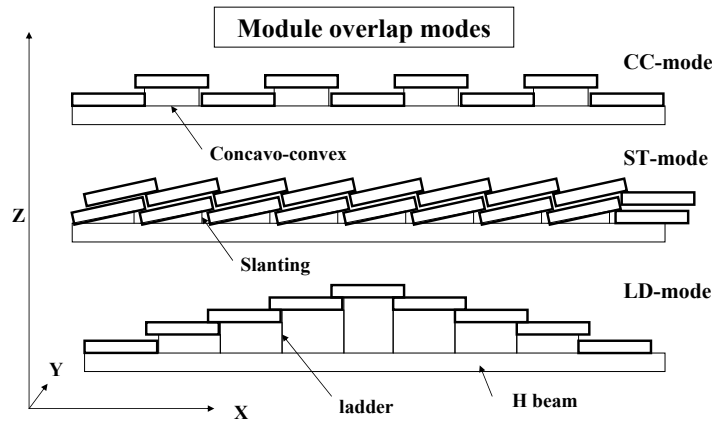


图 5.16: 三种模块摆放结构示意图

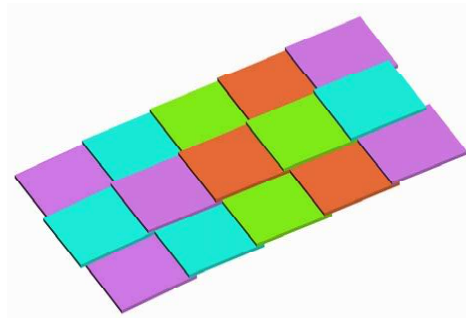


图 5.17: 模块的双层倾斜摆放方式示意图

5.4.2 RPC 地毯式阵列的模拟

• 模拟输入

将 RPC 模块的内部两种裸室交错叠放方式的几何（图 3.12）和模块间双层倾斜叠放方式（图 5.17）写入 G4dyb 模拟软件，得到远点模块在软件中的框架图（图 5.18），近点模块只是个数变少了，但是分析方法类同，最后的结果也类似。在写几何时，不管铝盒外框的长短，只要保证模块里 RPC 层的重叠是 10 cm 不变，模拟结果不会变化。模拟里写的铝盒是长宽 $2.16 \times 2.16 \text{ m}^2$ ，后来模块为了走线的需要，铝盒框变为 $2.2 \times 2.17 \text{ m}^2$ 。虽然和真实的几何有写出入，但是本质上没有变。如果模块设计长宽都为 2.16 m，从模块的外表看来，在长宽方向应该重叠 16 cm。如果模块为 $2.2 \times 2.17 \text{ m}^2$ ，在长宽方向应该分别重叠 20 cm 和 17 cm。

对于大亚湾远点，模块组成大约 $18 \text{ m} \times 18 \text{ m}$ 的面积区域，但是因为模块间也是交错摆列，有两个边是锯齿形状的，对于锯齿形状的区域（图 5.18(a)），在计算效率时候，如果有模块覆盖则算作灵敏区，没有模块覆盖，则不作计算。每个模块

中，从模块外边框到气体灵敏区域有 4 cm 的非灵敏区，在组成 18 米外边缘的地方不算做死区，其余在 18 m 外边缘以内的区域认为是死区，穿过的 μ 子在计算模块的效率时被认为作为效率计算的分母。如果有两层及以上着火，认为是一个 2/4 事例，如果有 3 层及以上着火，认为是一个 3/4 事例，作为分子，算出系统的效率。

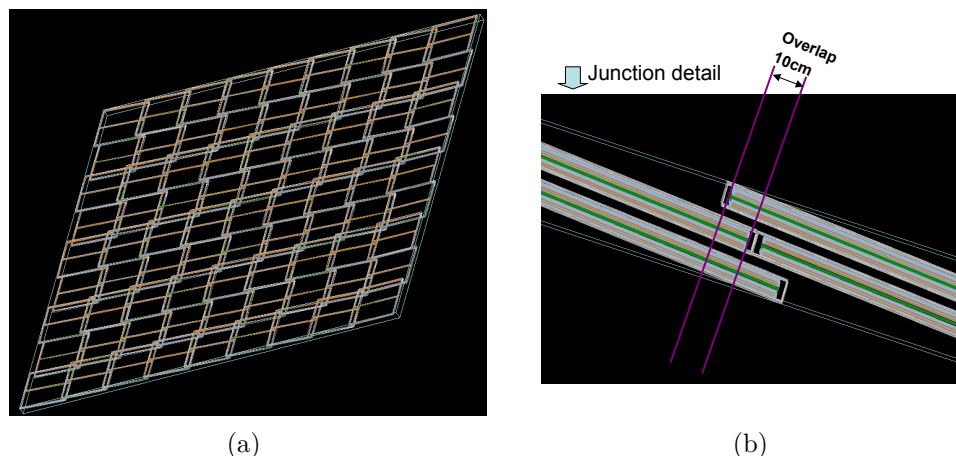


图 5.18: 远点模块在模拟软件中的几何(a)，四个模块连接处的细节(b)。

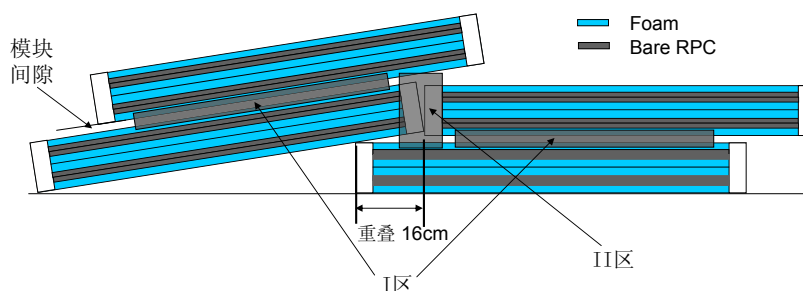


图 5.19: 模块的倾斜叠放示意图

• 模拟结果

表 5.8 模拟了模块间有不同大小缝隙的时候在不同选择模式下 RPC 地毯式阵列的整体效率。0 cm Gap 表示模块间紧贴着叠放（密排）。当裸室的效率为 95% 时，RPC 阵列的总效率在密排的情况下，接近 97%，在模块有 4 cm 的空隙时候降到 96.2%，但仍然不会低于 96%，符合大亚湾的最初设计目标：水池外，另外一种反符合系统的 μ 探测效率在 90-95%。所以只要 RPC 裸室的效率在 95% 以上，这种双层倾斜的交错排列方式，在重叠 10cm 裸室的情况下，就能达到目标。这里指出，重叠 10 cm 裸室，严格来说应该是 8 cm 气体灵敏区，因为裸室周围有 1 cm 的死区。

在小范围内每增加 2 cm 的空隙，系统的效率会降低约 0.3%，相应的非效率

(inefficiency) 增加 0.3% (非效率= 1 - 效率)。在最初设计模块的时候，模块外表是轻钢龙骨加“炸药包”样式的方管支撑结构的形式（图 5.20），模块间重叠需要考虑方管高度带来的模块间隙。后来设计成了不易生锈的铝盒子，外表没有支撑结构，就避免了这一情况。

不过在设计模块走线的时候，高压线、气管、信号线从每个模块出来，如果走模块的上表面将来更换某个模块时，需要使用天车吊装，会有线挡着，不容易操作并容易碰触线路。模块下面有撑 RPC 模块的二三十厘米高的 H 梁，如果这些线走模块下面 H 梁的缝隙里，则模块的更换维修操作变得方便，而且从工艺的角度看，整个 RPC 系统就不会因为电缆的覆盖而显的杂乱。

	两种摆放方式，裸室 $2.1\times1.1\text{m}^2$ 、 $2.1\times1.0\text{m}^2$					
模块间隙	0cm		2cm		4cm	
系统效率	非效率(%)	效率(%)	非效率(%)	效率(%)	非效率(%)	效率(%)
4选1	0.01	99.99	0.06	99.94	0.18	99.82
4选2	0.28	99.72	0.41	99.59	0.62	99.38
4选3	3.16	96.84	3.48	96.52	3.81	96.19

表 5.8: 不同模块摆放间隙下远点 RPC 系统的整体效率



图 5.20: 最初的模块设计

Luis Barrera [86] 也做过简单的 RPC 系统效率的模拟，只给出了 2/4 模式下效率，结果跟本文的类似。他模拟的几何中 RPC 裸室在模块内均匀分布，模块的每层看做一个 RPC 室，缺少了 RPC 裸室的交错重叠的情况，与真实的有较大不同，这会影响对死区的研究，又因为模块在 2/4 触发模式下本身的效率会很高，即使几何上有些不同也看不出太大的差异，但是在 3/4 触发下，效率就会有较大的不同。

前面假定裸室的效率是 95%，是在预研阶段给的裸室效率的一个通用的值，实

际应该按照裸室效率为 96% 来计算, 这时 RPC 系统的整体效率会达到 97%。

• 对结果的分析——丢失 μ 子的研究

按照理论计算 3.3, 如果每层的效率为 95%, 模块的 3/4 效率为 98.6%, 考虑模块内部中间部分, 由于边缘效应引起的死区, 模块的效率也应该为 97.25% (表 5.6)。而现在在最好的摆放下, 模块重叠了 16 cm, 即灵敏范围重叠了 8 cm 还是达不到单个模块的效率, 所以在密排下, 也有 μ 子穿过 RPC 模块, 但没有穿过 RPC 气体灵敏区。

先抛去大亚湾的重点关注对象 2/4 触发、3/4 触发, 来关注一下 1/4 触发。1/4 触发模式是只要一层着火就输出信号。将 RPC 效率设定为 100%, 即只要 μ 子碰到气体灵敏区, 就输出信号。如果整体效率还达不到 100%, 就是 RPC 层仍然没有覆盖完全的地方。

图 5.21(a) 表示密排的模块在 1/4 触发模式下取数, 并假设裸室气体灵敏区效率为 100% 的情况下的丢失 μ 子的二维位置分布, 参考平面 Z 平面选取的是 RPC 层最底部的钢支撑架的平面。可以看出丢失的 μ 子分布比较整齐, 是从模块的边缘穿过去的, 对应着图 5.19 的 I 区。因为模块密排 (0cm gap), 两个模块最近的气体灵敏区距离是 2.4 cm (两层 1 cm 的蜂窝板和绝缘层等), 两个模块气体灵敏区重叠 8 cm 宽。 μ 子如果穿过这里, 又不碰到气体灵敏区, 其 θ 角至少大于 $\text{atan}(8/2.4) \sim 73^\circ$ 。

(后来的设计, 模块底层蜂窝板厚为 2 cm, 灵敏区距离增加 1 cm, 大于 67 度以上的 μ 子就能通过而完全不被探测到。) 也可以看出, 点状分布比较多, 而且大部分在模块的四角处。为了弄清楚这个问题, 我们将 μ 角度放小, 小于 70 度, 发现 μ 子仍旧有丢失 (图 5.21(b)), 而且分布更加整齐, 都四个模块的交接处 (图 5.19 II 区)。模块间的重叠是跟前后左右方向的 4 个模块重叠 16 cm, 仔细研究发现, 模块跟 4 角上的前端两个模块有重叠, 在后端倾斜角底的两个模块只是紧挨着, 看侧面图 5.18(b) 的效果。这个紧挨着的两个模块里气体灵敏区之间是共有 8 cm 宽的死区的, 而其上方和下方的模块最近裸室相距约 10 cm, 即这时只要 θ 角大于 39 度的 μ 子就可以通过, 所以在图 5.21(b) 中显示丢失的分布位置在模块四个角的节点处。不过因为这些接口处的面积比较小, 由次引发的 μ 子丢失数量较少。

从图 5.21、5.22(a) 中 X 方向能看到 9 排模块的轮廓, 在 Y 层方向只能看到 5 排 μ 子丢失的轮廓线。 μ 子角分布在地面上是均匀的, 但是大厅上方的山体不是对称的, μ 子在经过了山体的削弱以后, 在 ϕ 角分布上较不对称。9 排模块奇数层在下偶数层在上, μ 子通过各排重叠区域的死区的时候, 在偶数排的两侧, μ 子 ϕ 角方向正好相反 (图 5.23)。这就导致了图 5.21、5.22(a) 中 Y 方向不同位置有一半轮廓线的缺失。但同样的条件下, 如果 μ 产生子在输入时候 ϕ 角旋转一定角度, μ 子丢失的分布就会如图 5.22(b) 那样的在 Y 方向分布比较匀称。可见地下 μ 子 ϕ 角的不

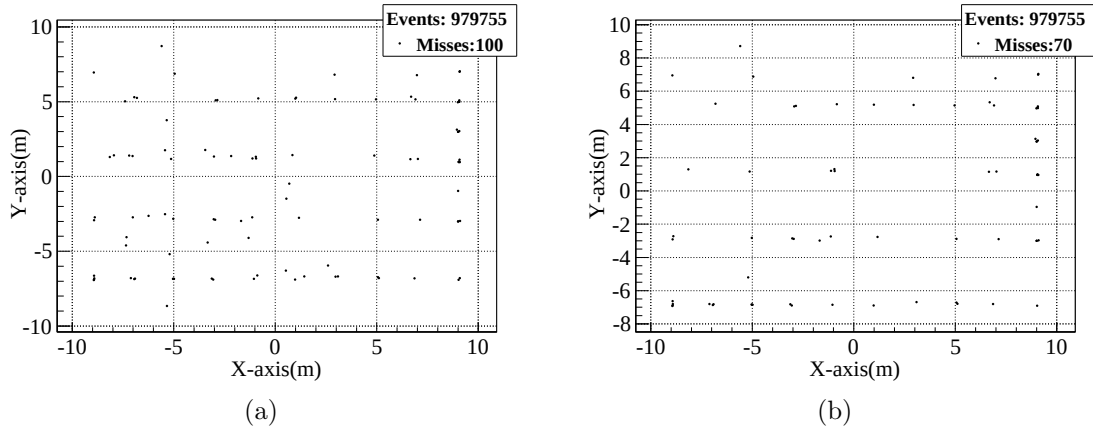


图 5.21: RPC 系统丢失的 μ 子位置分布。条件: 模块在没有间隙, 1/4 触发模式, 裸室效率 100%, (a) 所有流失 μ 子角度, (b) $\theta < 70^\circ$

均匀分布对 μ 子丢失的分布有一定的影响。

对于 I 区, 随模块间距离增加, 更多的 μ 子将穿过这里而不会着火, 加上裸室的效率不是 100%, 只要有一层没有着火, μ 子就更容易经过 I 区穿过去, 对应的是图 5.22 中 μ 子丢失较多的点组成的一条条的黑线区域。

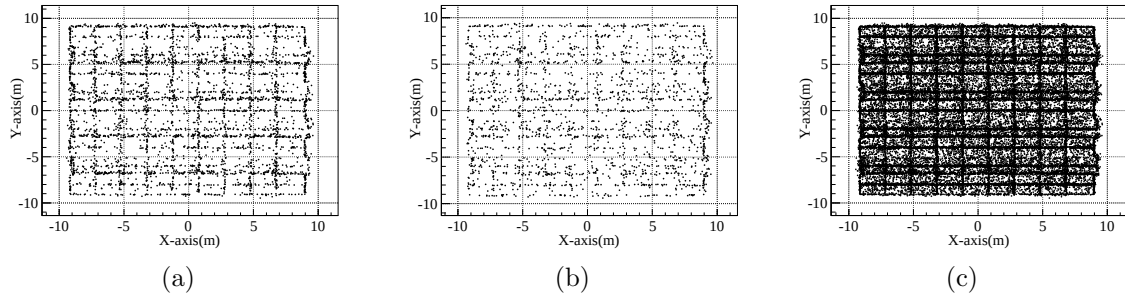


图 5.22: RPC 系统丢失 μ 子的位置分布。条件: 2 cm 模块间距、95% 裸室效率, (a)(b) 是 2/4 触发模式, (b) 旋转了一定角度, (c) 是 3/4 触发模式。

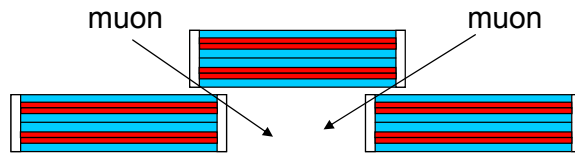


图 5.23: μ 子穿过模块死区示意图

图 5.24(a)、5.24(b)、5.24(c) 是 RPC 系统在不同的触发选择条件下丢失的 μ 子的 θ 角分布。可以看出在模块 1/4 的触发条件下 (假设裸室效率 95%), 丢失的全是大

角 μ 子, 随着触发选择条件的变化, 小角 μ 子的丢失也在逐渐增加, 并且在 3/4 触发模式时候, 小角 μ 子丢失的数量超过了大角 μ 子。也就是 3/4 触发模式下, 纯粹由探测器几何摆放造成的 μ 子丢失占据少数, 由探测器效率造成的 μ 子丢失占据多数, 所以在 3/4 触发模式下, 从提高裸室本身的效率入手, 系统效率提高会比较显著。但是探测器本身的效率已经达到了较高的水平, 再提高也比较困难。

图 5.24(d)、5.24(e)、5.24(f) 是表示在不同触发选择、不同角度丢失 μ 子的相对贡献。相对贡献的定义:

$$\text{相对贡献} = \frac{\text{每个bin中丢失的 } \mu \text{ 子数}}{\text{原始 } \mu \text{ 子在相应bin中的数目}} \quad (5.5)$$

可以看出, 使用不同的触发模式, 大角 μ 子的丢失的相对贡献一直是最多的。所以 RPC 模块对大角 μ 子探测能力相对较弱。大角 μ 子在宇宙线中较少, 在 RPC 探测器穿过时, 离中心探测器 (AD) 也比较远, 相对来说产生的中子对本底的贡献较小, 所以虽然没有探测到, 但是其对中微子的探测不会带来太大影响。

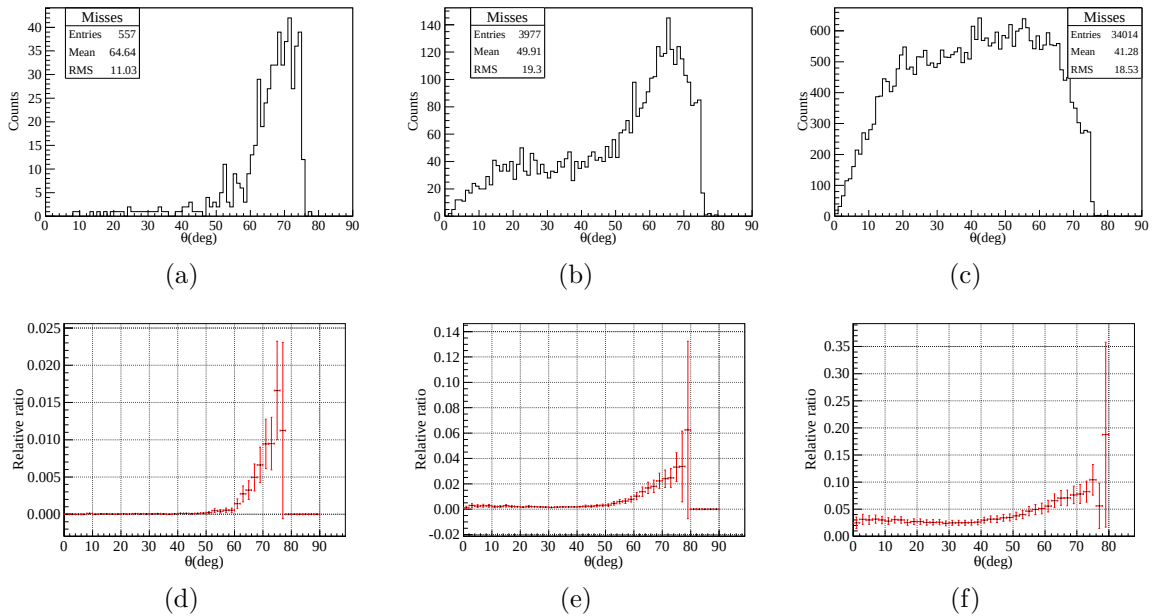


图 5.24: RPC 系统丢失的 μ 子角分布。(a)、(b)、(c) 分别对应 1/4、2/4、3/4 触发模式下的 μ 子角分布。(d)、(e)、(f) 是各自角分布的相对贡献。

5.4.3 两种裸室和一种裸室的系统效率对比

模拟中还输入了一种裸室 ($2.1 \times 1.05 \text{ m}^2$), 每层仍是两个裸室组成, 但是拼接地方的死区上下重叠, 即前面提到的 typeI 型结构 (图3.2)。一种裸室和两种裸室

在相同条件下（裸室效率 100%）的模拟结果见表 5.9。模拟了 10 万 μ 子，所以统计误差比较大，效率误差约为 0.05%。从表可以看出，两种摆放，在同样的模块间隙下，2/4 效率差别为 0.4%，3/4 效率差别为 $\sim 0.5\%$ 。这与图 3.3(a) 中 typeI (offset = 0 cm) 和 typeII (offset = 5 cm) 两种情况效率的差别一致，即两种裸室交错摆放能使单模块效率提高 $\sim 0.4\%$ ，同样也能使系统效率提高 0.4%。因为裸室的交叠摆放的死区在模块中间，对与模块之间引起的非效率不会影响，所以二者基本一致。

模块间隙	一种裸室 $2.1 \times 1.05 \text{m}^2$			两种裸室 $2.1 \times 1.1 \text{m}^2$ 、 $2.1 \times 1.0 \text{m}^2$		
	0cm	2cm	4cm	0cm	2cm	4cm
1/4非效率(%)	0.35	0.43	0.55	0.07	0.12	0.27
2/4非效率(%)	0.53	0.63	0.86	0.18	0.24	0.50
3/4非效率(%)	2.14	2.38	2.89	1.68	1.84	2.29

表 5.9: 系统非效率在裸室两种摆放下的对比

5.4.4 垫片 (spacer) 的影响

RPC 室中每隔一定距离会有一个 spacer 来保证气室的厚度 [56]，大亚湾 RPC 裸室中每隔 10 cm 也有一片 spacer [72]。有 spacer 的地方会形成死区。简单按照 spacer 的上表面积计算，其在裸室中的总面积约占裸室面积的 0.5%。在不同触发选择下，spacer 对系统的效率的影响程度可以通过模拟计算。

图 5.25 是模拟时候输入的 spacer。模拟结果如表 5.10，对比表 5.8 可以得出加入 spacer 之后，不管模块间隙多少，系统的非效率总是在 2/4 模式下增加 $\sim 0.1\%$ ，3/4 模式下增加 $\sim 0.34\%$ 。

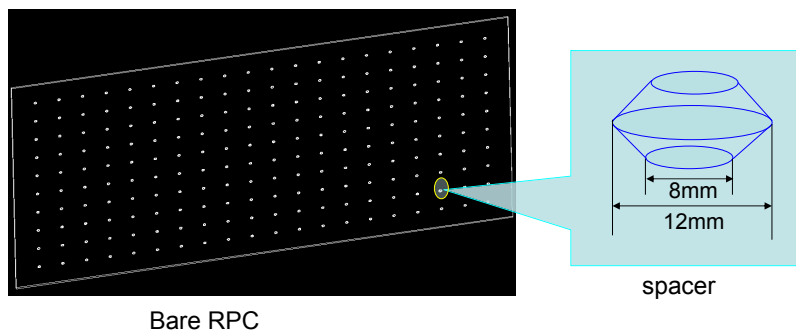


图 5.25: 模块中的垫片 (spacer)

	2.1×1.1m ² 、2.1×1.0m ²		
模块间隙	0cm	2cm	4cm
1/4非效率(%)	0.02	0.07	0.19
2/4非效率(%)	0.35	0.50	0.68
3/4非效率(%)	3.52	3.82	4.15

表 5.10: 考虑 spacer 之后, 不同模块摆放间隙下远点 RPC 系统的整体效率

所以我们对 spacer 也考虑了将不同层的 spacer 上下错开 2 cm, 来降低非效率 (图 5.26*)。

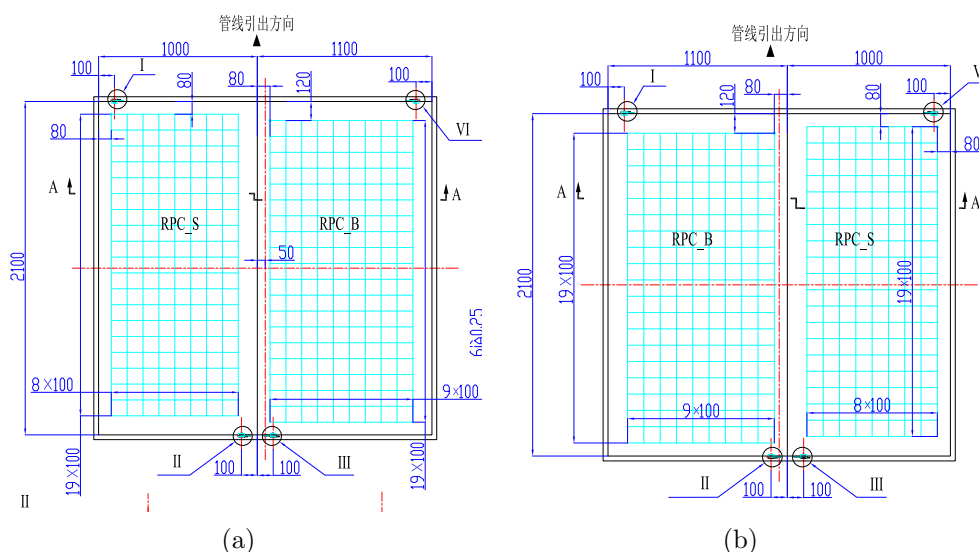


图 5.26: 模块内部 spacer 位置。(a)1、3层, (b)2、4层

这里是专门对 spacer 影响进行研究的, 需要将 spacer 写入模拟几何, 看其影响有多大。在模拟时, 裸室的效率是模拟后手动加上的, 一般加入的是测量的裸室效率, 但是在测量的时候得到的裸室效率是已经包含了 spacer 的影响, 所以模拟的时候, 在手动加裸室效率这一步已经相当于包含了 spacer 的贡献, 故模拟 RPC 系统效率的时候原则上是不应该加 spacer 几何的。若再加入 spacer 几何, 则输入的裸室测量效率就相当于纯灵敏气体的效率值, 得到模块的效率会比真实的效率低一些, 约 0.3%, 即 spacer 的影响。如果输入的是含有 spacer 的效率, 则在模拟里不需要加其几何, 这时相当于将 spacer 造成的非效率均匀撒在灵敏气体区域。因为 spacer 造成的效率下降比较小, 所以这个近似对整体效率的影响可以忽略。

*此图由谢宇广设计

5.4.5 RPC 倾角朝向

大亚湾各点实验大厅上方的山形为非对称，得到的实验大厅的 μ 子 ϕ 角分布也是非对称（图 5.27），又 RPC 在支撑结构上摆放有一定的倾斜角，在倾斜角朝向不同时候，穿过死区的 μ 子数量不同，就像图 5.22 表示的一样，当 μ 子角分布旋转一定的角度后其丢失的位置分布就会不同，所以当 RPC 模块倾角朝向不同方向时候，其探测 μ 子能力的大小也将不同。

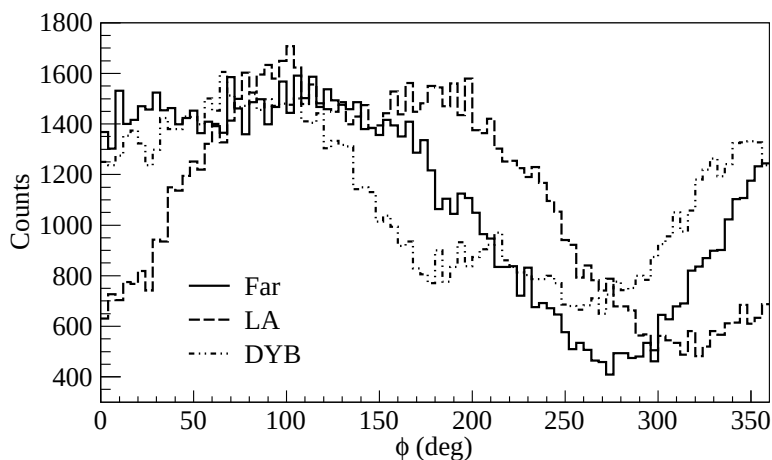


图 5.27: 大亚湾各点 μ 子 ϕ 角分布

模块斜放在支撑架上，定义其倾斜方向与水平面的夹角为倾向角。倾向角开口的方向为模块的朝向（图 5.28）。对于方形的支撑架来说，模块的朝向最多有四种，即模块的朝向沿支撑梁的两个方向和垂直支撑梁的两个方向。

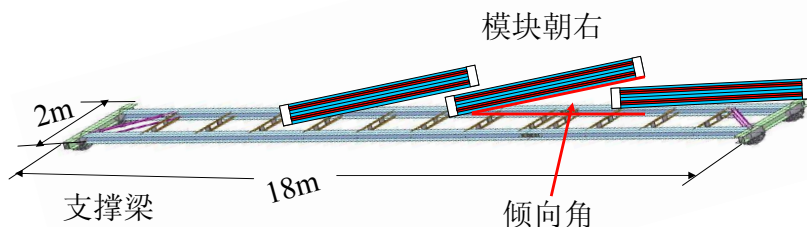


图 5.28: 模块的倾角

对 4 种朝向分别做了模拟，表 5.11 和 5.12 分别是在模拟中模块转动 0、180 和 90、270 度角下 RPC 系统的 2/4 和 3/4 效率。在远点，模块旋转 180 度时候，系统达到的效率最高，此时 RPC 模块的倾角背对气体间（为了在地下更直观的表现模块的朝向，我们以气体间为参照物）。在近点，RPC 模块旋转 0 度的时候，系统的效率最高，此时 RPC 模块的倾角应朝向气体间。在岭澳点，RPC 模块旋转 270 度的时

候，系统的效率最高，这时模块倾角垂直支撑架，但工程上实施有些困难，如在两个支撑梁拆开和对接的时候，可能会触碰电缆等。若去掉旋转 90 度、270 度这两项，则在旋转 180 度的时候系统的效率最高，其实跟旋转 270 度在 3/4 效率上差别不大，此时模块朝向气体间。用图 5.29 可以简单明了的表示。

实验点	远点		近点		岭澳点	
模块旋转度数	0	180	0	180	0	180
气体间	朝向	背对	朝向	背对	背对	朝向
2/4效率(%)	99.41	99.55	99.42	99.35	99.40	99.51
3/4效率(%)	95.87	96.43	96.12	95.80	95.92	96.37

表 5.11: 0、180 度旋转角时 RPC 系统效率

实验点	远点		近点		岭澳点	
模块旋转度数	90	270	90	270	90	270
2/4效率(%)	99.42	99.55	99.37	99.44	99.41	99.54
3/4效率(%)	95.88	96.38	95.82	96.06	95.90	96.42

表 5.12: 90、270 度旋转角时 RPC 系统效率

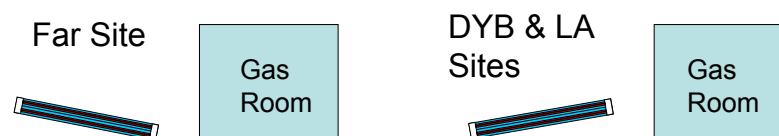


图 5.29: 三个实验点模块优化后的朝向

对远点和岭澳点的 RPC 探测器做 180 度的旋转跟没有旋转对比 3/4 效率提高约 0.5%。这样在硬件没有任何增加的条件下，只是将探测器的摆放方向变换一下，RPC 系统的探测效率就可以提高约 0.5%。跟减少 2 cm 模块间隙带来系统 0.3% 效率的升高来比，合适的摆放方向影响还是比较大的。

5.4.6 其他的触发模式

之前的研究是基于每个模块独立触发工作的条件下进行的分析。大亚湾 RPC 在取数的时候为了能保留更多的物理信息，提出一个模块如果有一个 2/4 触发，不仅

输出此模块的信息，周围 4 块的信息也全输出。这样在分析数据的时候，可能会找出更多的物理。下面分析此种取数模式能否帮助 RPC 系统增加探测 μ 子的能力。

如果一个模块有两层着火，周围的模块中有两层或者一层着火，联合起来也可以得到有 4 层或 3 层 RPC 室着火的信号。我们把这两种情况的触发写作 $O2/4 \& O2/4$ 、 $O2/4 \& O1/4$ 。 $O2/4$ 跟以前的 $2/4$ 有所区别，这里是只有两层着火的意思（Only two layers fire）。这两种逻辑可以被 $3/4$ 分析数据时采用。

使用上一节各个实验点最好的摆放配置，假设裸室的效率为 95%，使用 G4dyb 模拟 10^6 个 μ 子，来分析两种数据模式带来的系统探测效率的增加。

实验点	远点	近点	岭澳点
$O2/4 \& O2/4$ 效率的增加(%)	0.16	0.15	0.14
$O2/4 \& O1/4$ 效率的增加(%)	0.09	0.11	0.10

表 5.13: 模块间的触发模式对系统效率的增加

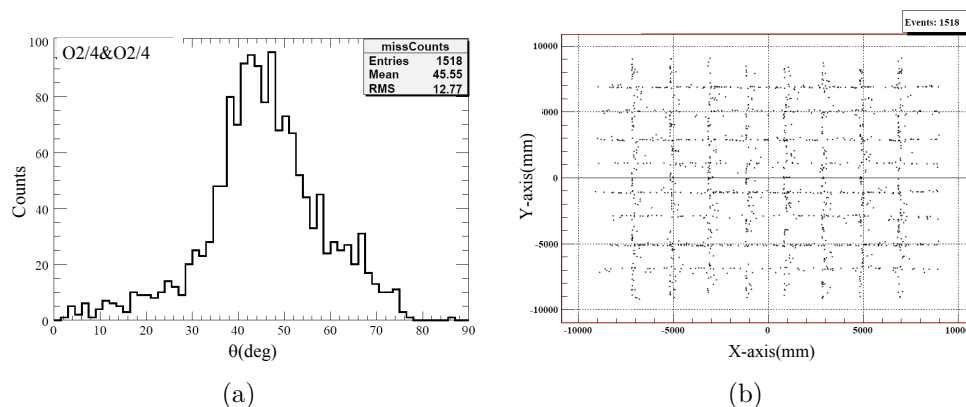
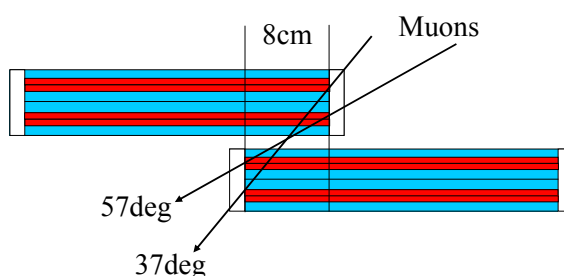
从表 5.13 中可以看出，增加 $O2/4 \& O2/4$ 触发分析可以使 RPC 系统的探测效率增加约 0.15%，增加 $O2/4 \& O1/4$ 触发分析可以使探测效率增加 0.1%，联合起来为 0.25%。

模块间重叠面积占模块的 15%，而这两种情况对 μ 子探测能力的增加比较小。假设裸室效率是 95%，理论计算正好两层着火的概率为 1.4%，加上使另外一只模块也是正好两层着火，这种贡献有 $1.4\% \times 1.4\%$ 。

但是在模块重叠的边缘处，只要一个模块两层着火， μ 子穿过另外一个模块时只要 θ 角在 37 到 57 度的范围内（图 5.31），就会有 90% 的几率两层着火。37 到 57 范围的 μ 子也占多数，所以这种情况的贡献占大多数。可以估算这种的贡献是 $1.4\% \times 15\% \times 0.9 \times 0.9 \sim 0.17\%$ 。图 5.30(a) 表示的是正好击中有重叠的两个模块的各自两层的 μ 子的角分布。可以看出 37 到 57 度范围内， μ 子的丢失占了绝大多数，正好验证了刚才的分析。图 5.30(b) 是击中的这些 μ 子的位置分布。可以看出，这些 μ 子都分布在模块的周围，即重叠的区域。周围模块击中一层对 $3/4$ 效率贡献的分析方法与此类似。

如果模块的某一层坏了，模块中两层正好着火的几率升至 13.5%，再跟周围模块联合，达到共 4 层着火，这时会使探测效率升高 1.6%。当模块有层数坏的时候，模块间的联合分析对探测器的探测能力的提升较为明显。

如果考虑模块四个角上的模块，只有 4 小块重叠，这些重叠是所有重叠面积的 5%，所以对 $3/4$ 效率的贡献比前面的两种情况小一个量级。故可以忽略这种信息。所以电子学取数时候 [87]，如果一个模块 $2/4$ 着火，输出周围四个就够了。角上四

图 5.30: μ 子正好击中两个模块两层的 θ 角分布和位置分布图 5.31: μ 子穿过模块间隙示意图

个模块的触发信息可以忽略。

在O2/4&O2/4 和 O2/4&O1/4 这两种触发模式下, 通过公式 3.4 可知, 偶然符合带来的噪音很低 $\sim 10^{-7}$, 可以忽略。而 μ 子跟噪音的符合也很低, 可以忽略。这种触发方式得到的 μ 子信号比较纯净。

5.5 本章总结

本章介绍了模拟中使用高精度地图和考虑各种因素, 得到较为精确的地下 μ 子能量和角分布, 已经用于大亚湾的地下模拟。对 μ 子正负比做了详细的调研, 使用适合大亚湾的实验数据, 最后对其做了拟合, 解决了 μ 子在模拟输入时候低能 μ 子正负比出现跳变的问题, 并提出了在大亚湾测量 μ 子正负比的一个方法。

对单元模块进行了详细模拟, 将每部裸室的摆放设计成交错重叠的方式, 并研究了这种设计方式下, 使用 XYYX 读出方式, 各个小块的效率特点, 中心两排小块将比其他小块的效率低约 5% 左右, 与实验相符合。

详细模拟研究了模块间在不同摆放下, RPC 系统的整体效率。在裸室灵敏气体效率为 95% 的情况下, 在模块重叠为 2 cm 情况下, RPC 系统 2/4 的效率约为 99.6%, 3/4 的效率约为 96.5%。详细研究了在模块倾斜重叠的摆放下 μ 子的丢失, 在 1/4、2/4 模式下大角 μ 子对非效率贡献比较大, 而在 3/4 模式下, 大角 μ 子的贡献能力减弱。模块间重叠缝隙每增加 2 cm, 系统 3/4 效率降低 0.3%。spacer 对 2/4 的效率影响为 0.1%, 3/4 影响约为 0.34%。使用两种裸室交错摆放比一种摆放系统效率在 3/4 模式下提高约 0.5%。

根据大亚湾 μ 子角分布的不对称性, 设计了最佳模块倾角摆放, 即远点模块倾角背对气体间, 两个近点都朝向气体间, 可以将系统效率提高约 0.5%。还分析了 RPC 电子学在每个模块独立工作也输出周围信息情况下, 将来可以做的其他数据触发方面的物理分析。

第 6 章 望远镜 RPC 及其对本底的研究

大亚湾 RPC 地毯式阵列探测器用于标记 μ 子本底信号，联合水池反符合探测器，降低中微子实验本底。望远镜 RPC 作为大亚湾 RPC 地毯式阵列后加的一个组成部分，将使 RPC 地毯式探测器发挥更多的作用，提高对本底的探测能力，更是具有对岩石中子的探测能力，同时对水池、中心探测器（AD）的监测方面也将发挥重要作用。本章将具体介绍望远镜 RPC 的提出，在各方面发挥的作用，及对本地的探测等方面的模拟。

6.1 望远镜 RPC 的提出

大亚湾 RPC 探测器对 μ 子的位置分辨为 7.5 cm，地毯式阵列的设计将标记出 μ 子径迹的穿过位置。在水池中因为光电倍增管（PMT）的排布比较稀，位置分辨约为 1 m，目前重建精度最好在半米量级。AD 只能探测穿过 AD 的 μ 子，对 μ 子的重建精度约几十厘米。相比较而言，RPC 探测器的位置分辨最好。

虽然 RPC 的位置分辨最好，但是地毯式阵列的 RPC 不能标记出 μ 子径迹的方向。径迹的方向需要靠水池或者 AD 的重建来确定。如果在地毯式 RPC 阵列的上方再增加 RPC，上下 RPC 联合，就可以将 μ 子穿过的方向定的比较准。这样通过 μ 子径迹就能做比较多的物理内容：

1) 地下 μ 子角分布。通过上面望远镜 RPC 和下面地毯式 RPC 阵列联合，就能将 μ 子角分布比较精确的定出来。

2) 验证水池和 AD 的 μ 子重建。RPC 重建出来的 μ 子，是上下 RPC 直接的测量得到，不依赖于重建算法。而水池和 AD 对 μ 子重建的好坏一定程度上依赖于重建算法。可以使用 RPC 选取精确的 μ 子径迹，和水池及 AD 重建相比较，验证和改进重建算法。

3) 监测水池。选定特定的 μ 子，监测水池各个部位的 PMT 收到的光电子数。进而可以研究水衰减长度，Tyvek 反射率等。这里 μ 子相当于天然的刻度源，比较稳定，比 LED 具有优势。

4)验证水池对 μ 子的探测效率。选取特定的 μ 子, 比如穿过水池边角的 μ 子, 研究水池对这种短 track 的 μ 子的探测能力。可以得到不同 track 长度跟效率的关系, 进而研究和改进水池的模拟等。

5)研究 μ 子径迹到 AD 中心的距离与其对 AD 本底的贡献。通过选取 RPC 数据标记的 μ 子, 计算出到 AD 中心的距离, 并通过时间关联得到其产生的中子本底在 AD 的能量响应, 可以给出不同距离的 μ 子对中心探测器本底的贡献大小, 进而研究中子的传输过程等。

6)岩石中子。利用底部地毯式 RPC 阵列比水池四周宽 1 m, 可以上下选择只穿过岩石的 μ 子, 来找 μ 子穿过岩石形成的中子在 AD 里的响应, 给出到 AD 中心不同距离 μ 子产生的岩石中子对本底的贡献。这也是水池契伦科夫探测器所做不到的。因为水池只能探测 μ 子的契伦科夫光信号, 对于打在岩石中的 μ 子, 产生的中子在穿过水池的时候, 水契伦科夫是探测不到的。水池对中子本底的贡献只能是起到屏蔽作用, 但实验中总是有一些岩石中子会跑到 AD, 形成本底。而望远镜 RPC 则就能研究一部分这种岩石中子本底。

6.2 望远镜 RPC 的设计

本节模拟使用高精度的地下 μ 子样本, 利用 Geant4 在大亚湾实验大厅进行模拟, 优化设计。

最初是想在水池的上方设计一块 RPC, 各个方位角都能测到, 能够得到比较好的 μ 子角分布, 但是模块放在大厅的上方, 会影响起重机的的工作, 如果放在起重机的上方, 模块距离底部 RPC 地毯式阵列太远, μ 子计数率太低, 所以只能在水池边上放置。

放在水池一边的时候, 望远镜 RPC 跟底部 RPC 阵列联合, 测到的 μ 子 ϕ 分布不全, 只是一半, 如图 6.1。左图是放在在水池宽边的区域, 右图是放在在水池窄边的区域望远镜 RPC 能够测到的 μ 子 ϕ 角分布。图中点是模拟输入的 μ 子分布, 直方图是模拟使用上下 RPC 得到的角分布。可以看出, ϕ 角各缺失一半。 θ 角虽然不受 ϕ 缺失的影响, 但是也是扭曲变形, 不容易对上。

最后考虑了在水池两边各增加一块 RPC, 形成对称结构, 两块结合就能将 θ 、 ϕ 角测的比较全面, 而且对岩石中子的测量统计量也加倍。

高度的设计方面, 设计了 2 m 高 (图 6.2), 即从边上 RPC 支撑架算起是两米高。这样不是太高即容易进行操作, 又不会挡住机柜等不会耽误望远镜下面的工作, 能够测量到的 μ 子事例率也比较高。为了不影响水池里的工作, 望远镜 RPC 完全在水池外边, 边缘跟水池边齐。

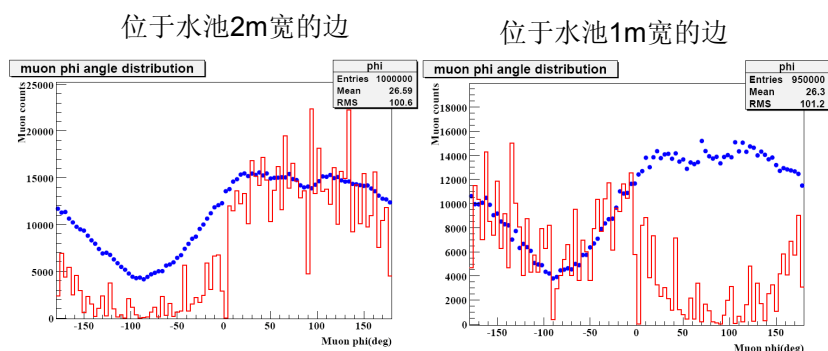


图 6.1: 边上一个望远镜测得 μ 子 ϕ 角分布。左图是放在在水池 2 m 宽区，右图是放在在水池 1 m 宽区

望远镜在水池的中心线上，关于水池对称。原来也研究过非对称的情形，比如纵向一个高一个低，得到的 μ 子角分布跟输入的分布比较难符合。横向不对称方面，因为使用望远镜来测量岩石中子统计量相对比较少，使一个望远镜沿水池边平移接近一个 AD，结果通过望远镜 RPC 的 μ 子在 AD 中产生的中子数没有增加，因为在中心时候距离两个 AD 距离相等，两个 AD 贡献一样，若各自接近一个 AD，相对来说离另外一个就远，通过望远镜总的探测数没有增加。最终设计是在水池两边对称设计（图 6.2）。

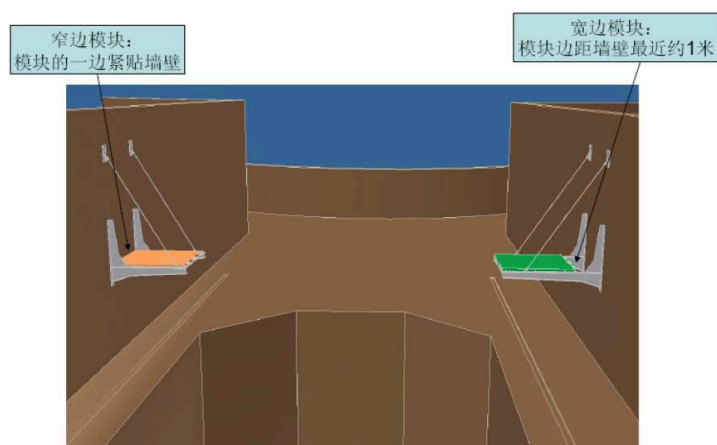


图 6.2: 两个望远镜的机械设计图

6.3 望远镜对 μ 子角分布的探测

将高精度的地下 μ 产生子和大亚湾的 RPC 模块阵列的真实几何和摆放输入基于 Geant4 的大亚湾 G4dyb 模拟软件中，通过上下 RPC 联合进行 μ 子角分布的模拟。

首先我们先看 RPC 的位置分辨。对于 RPC 位置分辨，理论上计算是 $26 \text{ cm}/\sqrt{12} \approx 7.5 \text{ cm}$ 。图 6.3 是模拟给出 RPC 测量值和真实值之间差。通过拟合，可以看出位置分辨是小于 0.1 m 。

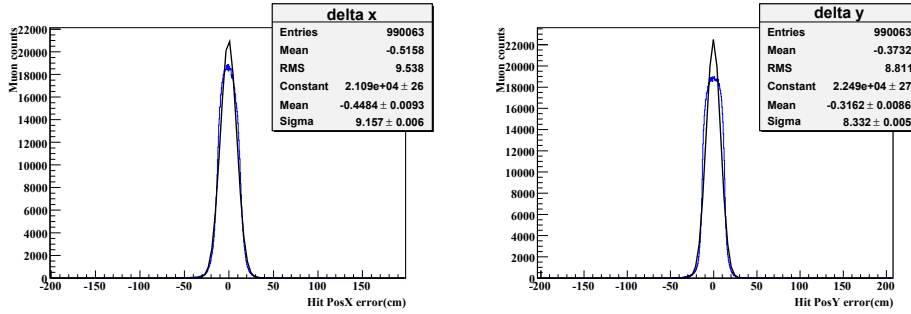


图 6.3: 读出条位置分辨。左图是X方向位置分辨，右图是Y方向位置分辨。

两个望远镜 RPC 联合底部的 RPC 地毯式阵列重建得到地下的 μ 子角分布。图 6.4 给出了将来能够测量到的地下 μ 子角分布图。可以看出 θ 和 ϕ 角分布测量的跟输入的符合的很好。

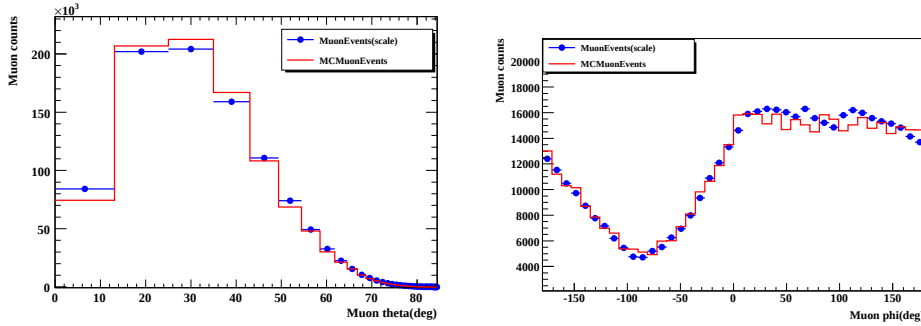


图 6.4: μ 子角分布。左图是 θ 角分布，右图是 ϕ 角分布。

图 6.5 中，左图是 θ 角分布分辨，右图是 ϕ 角分布分辨。 θ 角分辨 ~ 2 度， ϕ 角分辨是 ~ 4.6 度。

但是垂直穿过望远镜的 μ 子（ θ 角较小的情况），填直方图时按照角度均匀分 bin 不是太好，因为在望远镜正下方对着的 26 cm 小块，和远处偏离望远镜 RPC 的 26 cm 小块所能测量的角度范围不一样。正下方的小块测量的角度范围是 7 度，而水平距离望远镜 5 米远处的小块跟望远镜联合测量的角度范围只有 1 度。精度更高。所以在同样的分 bin 条件下， θ 角比较小的分辨较差， θ 角越大，分辨越好。于是在直方图的 bin 的处理上使用了变 bin 的处理方法(图 6.6 左)，取 L 为固定长度，得到的 θ 随 L 不同位置而变化。

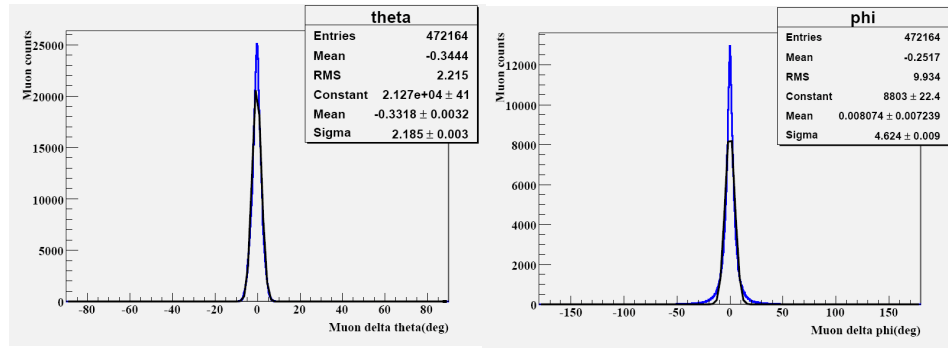


图 6.5: μ 子角分布的分辨。左图是 θ 角分布分辨，右图是 ϕ 角分布分辨。

当垂直 μ 子，穿过在望远镜模块及其正下方的模块， μ 子的 ϕ 角其实是不准的，特别是当 μ 子的 θ 角接近 0 度的时候， ϕ 角从 0 度到 360 度是测不准的。在处理数据的时候采取了，如果一个 μ 子过来，击中了 RPC 的小块，不取这个小块的中心位置为 hit 点，是放入一个均匀分布，将 μ 子在小块中间的 26 cm 长的线上均匀取值（图 6.6 右），这样的得到的结果就符合的比较好（图 6.4 右）。

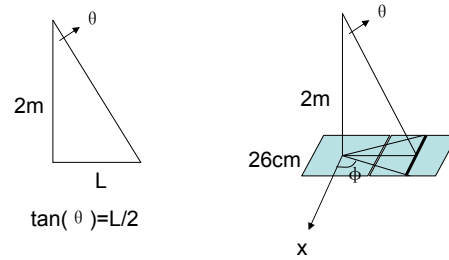


图 6.6: 变 bin 处理方法。左图是 θ 变 bin 的处理方法，右图是 ϕ 角的处理方法。

6.4 对水池的监测

模拟输入通过望远镜 RPC 的 μ 子，得到这些 μ 子在水中的径迹 (track) 长度分布和契仑科夫光。图 6.7 是通过望远镜 RPC 的 μ 子在水池中的 track 长度分布（图(a)），图(b)是 μ 子穿过水池的 total PE (photo electron) 分布。图(c)是单位长度的 PE 分布。可以看出单位长度的光电子数有个约为 100 的峰值。

只要 μ 子穿过上下 RPC（望远镜及地毯式阵列 RPC）通过几何计算就能知道在水中真正的径迹长度，通过水池 PMT 收集的光电子数除以这个径迹长度就是单位长度的光电子数。如果水池有变化，比如水质变差，单位径迹长度的光电子数就会减少，峰值会往左移，所以通过单位长度的光电子数可以监测水池的稳定性。还可以选择只通过边角的 μ 子，研究各边角的水循环状态。

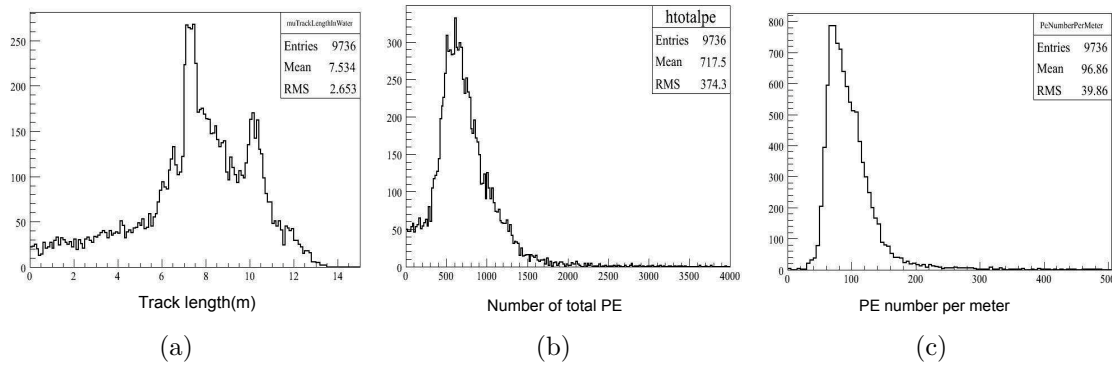


图 6.7: 对水池的监测。(a)是 μ 子在水池中的 track 长度, (b)是 μ 子穿过水池的 total PE(photo electron)分布。(c)是单位长度的 PE 分布

6.5 对 neutron 本底的探测

望远镜 RPC 一个非常重要的作用是对中子本底的探测。上下 RPC 联合, 可将 μ 子径迹精确的定位出来, 从而可以研究 μ 子径迹到 AD 中心的不同距离对 AD 本底的贡献大小, 从而对大亚湾中子本底, 特别是对岩石中子本底, 给出一个较好的评估, 更有利于达到精确测量 θ_{13} 的物理目标。

6.5.1 中子本底

因为能在 AD 中被俘获的中子相对于 μ 子的数目比较少, 直接使用 μ 子对中子本底进行模拟比较耗时, 所以在对中子本底的模拟中分成两步, 第一步使用高精度 μ 产生子输入 G4dyb 软件, 先进行 μ 子模拟, 产生的中子作为产生子再多次抽样, 进行中子模拟。图 6.8 表示的是穿过望远镜 RPC 的 μ 子产生中子的位置分布。中子大部分产生在四周、顶部、水和底部的岩石, 在望远镜的下方因为没有岩石, 只有空气, 产生的中子比较少。在望远镜上方附近的岩石 (侧面) 产生的中子最多。

在望远镜 RPC 能够测量的 μ 子产生的中子在 AD 中有能量沉积 (Edep, energy deposit) 和被液闪或者掺 Gd 液闪俘获 (Capture) 这样的中子事例中, 中子原始产生的位置比例如表 6.1 (远点模拟的结果)。可以看出在远点, 发生中子俘获的事例中, 岩石中子只占 0.3%, 越靠近 AD 中心, 能够发生俘获的就越多。中子在 AD 中有能量沉积的事例中, 岩石占 0.5%, 水和白油相对占的比例变大, 液闪和掺钆液闪比例相对变少, 且中子数量一样多。

由上下 RPC 符合确定径迹的 μ 子, 若产生的中子在 AD 里有能量响应, 则就有可能形成中微子本底。图 6.9 左图是产生这种类型的中子的 μ 子的径迹到 AD 中心的

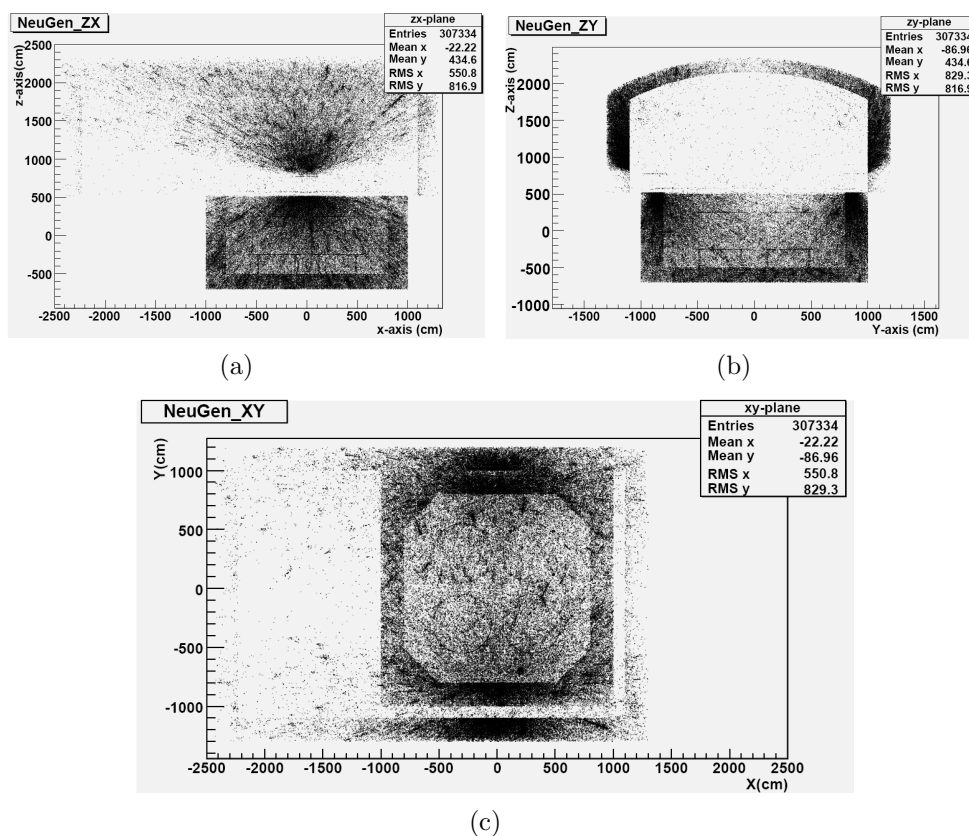


图 6.8: 穿过望远镜 RPC 的 μ 子产生的中子位置分布。(a)是 XZ 位置分布, (b)是 YZ 位置分布, (c)是 XY 位置分布。

	总中子数	岩石	水	白油	液闪	掺钎液闪
Capture	1	0.3%	7%	9%	36%	42%
Edep	1	0.5%	16%	18%	24%	24%

表 6.1: 中子在 AD 中有能量响应和被俘获的原始位置数量比。只列出了几个主要物质, 其他没有列出。

距离分布图, 右图是所有穿过水池的 μ 子距离 AD 中心的距离分布图, 使用两图相除得到, μ 子不同距离的产生的中子对 AD 本底的相对贡献 (图 6.10)。

其物理意义是平均每个 μ 子, 在不同距离产生中子并能对 AD 有本底贡献的几率。可见距离 AD 中心越远贡献本底的能力越弱, 成指数下降。使用指数去拟合, 给出贡献几率随距离的衰减, 我们定义为有效的衰减长度, $1/1.82 \approx 0.55$ m。将来可以利用望远镜上下符合研究 μ 子在水池中产生中子对本底的贡献, 从而可以验证 Geant4 对中子模拟的准确性。

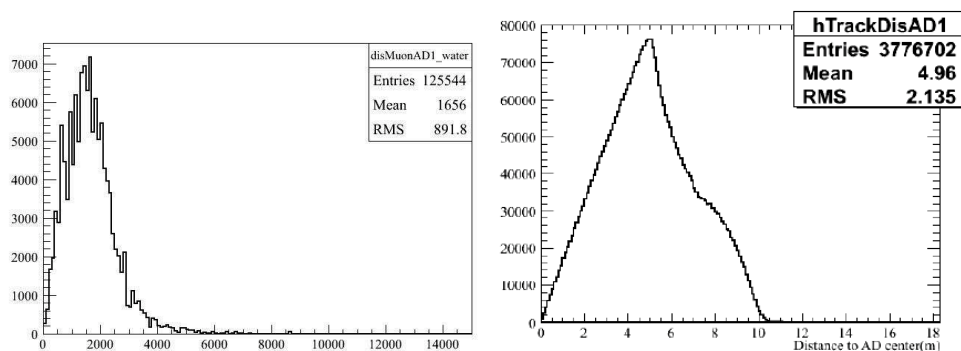


图 6.9: μ 子距离 AD 中心不同距离的分布。左图是在 AD 中有能量响应的中子的 μ 子距离 AD 中心的距离分布图, 右图是所有穿过水池的 μ 子距离 AD 中心的距离分布图。

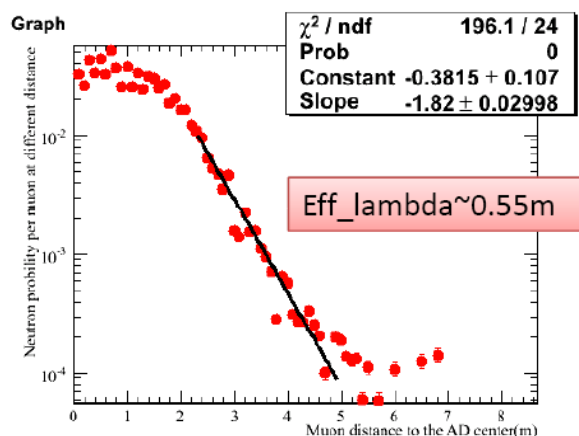


图 6.10: μ 子距 AD 中心不同距离的相对贡献

6.5.2 岩石中子本底

岩石中子本底是大亚湾中微子实验本底中一个重要的本底来源。大亚湾实验要求将本底压到非常低的水平 ($\sim 0.2\%$), 就要求:

- 1) 反符合系统有非常高的探测效率。
- 2) 岩石中子本底有较为准确的评估。

对于第一点我们设计了多重反符合探测器 (水池 + RPC) 来解决。对于第二点还没有非常有效的解决方法, 只能将来通过模拟 (Monte Carlo) 评估岩石中子本底。

图 6.11 表示, 在 2.5 m 厚的水的情况下, 岩石中子带来的本底和反符合剩余来比, 岩石中子占一半以上。可以看出岩石中子本底在中子本底里占了较大的比例, 而模拟中对中子的输运过程还不是完全清楚, 依赖于模拟参数, 但如果有了望远镜 RPC 与底部 RPC 的联合就可以得到一部分穿过岩石的 μ 子径迹距 AD 中心的距离及

不同距离对本底的贡献大小。

水厚(cm)	200		250	
Rate	反符合剩余	岩石中子	反符合剩余	岩石中子
单中子	0.447	1.429	0.446	0.627
快中子	0.02	0.058	0.0198	0.024

图 6.11: 不同系统对中子本底的贡献 [61]

表 6.2 给出望远镜 RPC 能够测量中子本底事例率的统计。可以知道，通过望远镜 RPC 的 μ 子大约每个 μ 子在远点产生 0.5 个中子，在近点产生 0.3 个中子，这个差别是由近点 μ 子的平均能量低造成的。发生中子俘获 (neutron capture) 的 μ 子事例在远点每天能测到 30 个，近点每天能测到 500 个。三年的统计量远点为 3 万，近厅为 50 万，在岩石中子方面，望远镜每天能测到远点的岩石中子在 AD 中 capture 的数量是 0.56 个，近点是 2 个，统计量比较少。因为望远镜的面积比较小，每个大厅两个望远镜约 8 平米，相当于近厅水池表面积的 5%，远厅水池表面积的 3%，而又对于大亚湾高精度的实验来说，上下穿过望远镜的 μ 子再在岩石中产生中子，并能在 AD 中形成本底信号的事例本来就应该少之又少。不过在近点三年也有两万事例，统计量也已经足够。

Option	Far	Near
Neutrons/ μ	~ 0.5	~ 0.3
μ rate [119](Hz/m ²)	0.048	1.27
μ counts(neutron capture/day)	~ 30	~ 500
Rock neutrons(capture)/day	~ 0.56	~ 2

表 6.2: 望远镜 RPC 测量中子本底在远近点的统计量

图 6.12 表示的是远厅能在 AD 中有响应的岩石中子产生的位置分布，左图为 XY 位置分布，右图为 ZY 位置分布。可以看出望远镜测到的能在 AD 中形成本底的岩石中子大部分分布在望远镜的附近，即侧面的岩石。顶部和水池底部的岩石中子本底比较少。

图 6.13 是近厅约 100 天时间里 70 个 μ 子产生的岩石中子在 AD1 中被俘获，这 70 个 μ 子的径迹距离 AD1 中心的距离分布图。实线是真实的 μ 子距离，虚线是经过上下 RPC 符合模拟测量出来的径迹，可以看出，实线和虚线符合的比较好。右图是真实的距离减去测量的距离分布图，虽然数量比较少，仍旧像高斯分布，误差大约

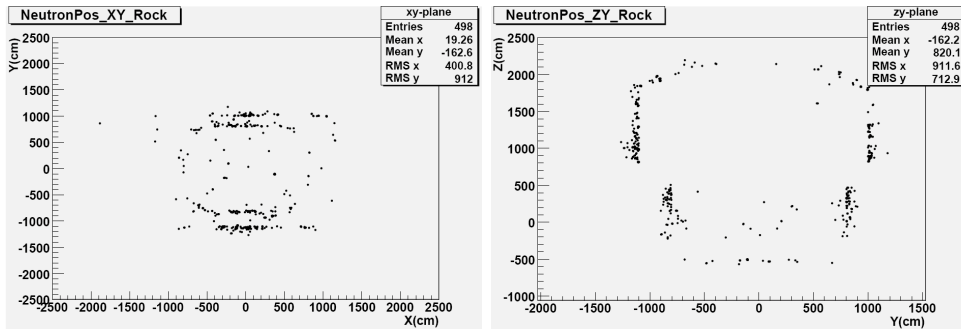


图 6.12: 岩石中子的位置分布。左图为 XY 位置分布，右图为 ZY 位置分布。

为 8.5 cm。可以看出说明使用望远镜RPC得到的产生岩石中子本底的 μ 子径迹精度也比较高。

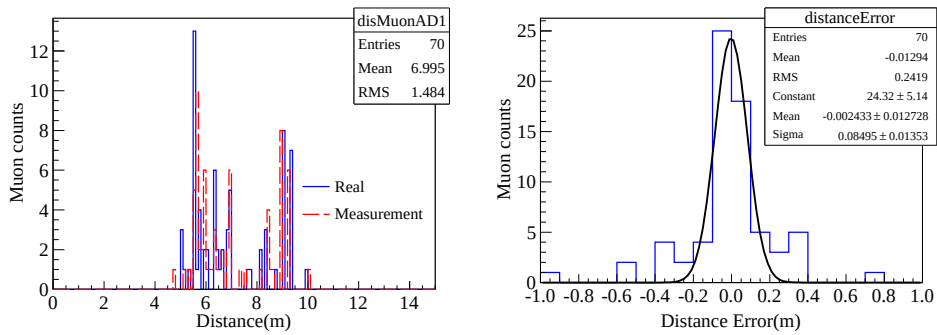


图 6.13: μ 子距离 AD 中心不同距离的贡献。

图 6.14 是使用上一小节的同样的方法得到的岩石中子的相对贡献。可以看出距离 AD 越远的岩石，贡献呈指数衰减。拟合得到有效的衰减长度为 ~ 1 m。

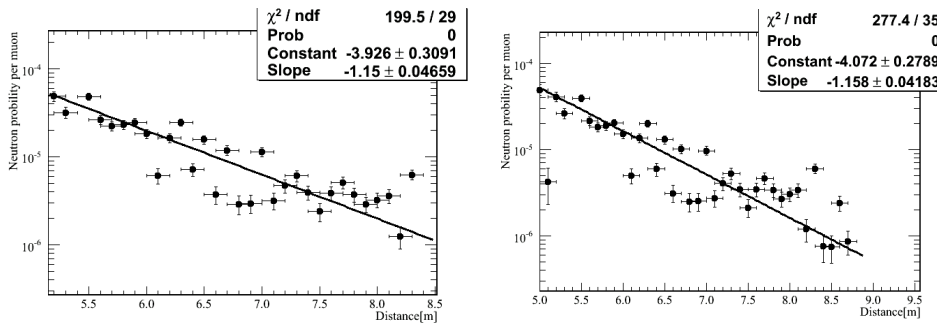


图 6.14: μ 子距离 AD 中心不同距离的贡献。左图是 AD1，右图是 AD2。

6.6 本章总结

本章提出了在大亚湾每个实验大厅增加望远镜 RPC 模块的设想。增加望远镜 RPC，可以增加大亚湾比较多的物理测量内容，并与模拟相互验证。可以给出比较精确的地下 μ 子角分布；可以选择特定角度特定入射点 μ 子，对水池 PMT，水池效率，水循环等进行监测；可以研究大亚湾未知领域——岩石中子，对本底的贡献，为 θ_{13} 的测量精度做贡献。并对望远镜摆放位置，数量等，各方面进行了优化设计，提议在水池两边的中心线上距离 RPC 底层高 2 m 处各加一块 RPC 模块，该设计方案已被合作组采纳。

第 7 章 总结与展望

本文对大亚湾实验双重反符合探测器中的 RPC 探测器进行了详细阐述。对 RPC 模块进行了设计、计算和详细的模拟，并对大亚湾模块进行了严格的质量检验和性能研究。

阐述了模块单元方面的大小和层数的设计，不同触发模式的研究，并简单估算了在有层数坏的情况下，使用 $2/3$ 或者 $2/2$ 触发模式的可能性。在高能所搭建的模块测量系统，对模块单元进行了详细的测量和研究，而且高压、气体、电子学及探测器本身等方面连成一个有机整体，为大亚湾的 RPC 系统运行提供了经验。给出探测器工作点，给出物理方面模块质量控制标准，对模块进行筛选，目前为止共测量了 143 个合格的模块，128 个模块已经运往大亚湾，并在现场进行了各方面检查，结果良好。

详细模拟 RPC 系统在大亚湾的整体效率。在裸室效率为 95% 模块重叠为 2 cm 情况下，RPC 系统 $3/4$ 效率大于 96%，符合大亚湾的物理设计要求 [30]。给出探测器的最佳摆放，将系统效率提高约 0.5%。

考虑真实的山形，和大亚湾物理模拟的需要，将 μ 产生子进行了各方面的更新，得到精确的地下 μ 子角分布，已经用于大亚湾的模拟。提出的增加望远镜 RPC 的设想。对望远镜 RPC 进行了优化设计，最后在每个实验大厅水池边上 2 m 高处，各增加一块 RPC 模块作为望远镜。这可增加比较多的物理测量内容，特别是对岩石中子的探测方面填补了空白。

本文对 RPC 探测器探测效率进行了各方面的详细研究，同时工作中也有一些不足之处：在现有的模块摆放几何下，虽然 RPC 探测器的整体效率比较高，但是对于穿过缝隙没有被 RPC 探测到的 μ 子，还需要通过水池联合来进一步研究，确定其对中微子实验最终造成的影响。在 RPC 噪音方面没有做细致的研究，虽然在 $3/4$ 触发模式下，噪音已经压的比较低，但是近点仍有 $\sim 4\%$ 的噪音触发，跟低事例率的中微子实验来比，也不能忽略。将来实验数据进行事例筛选和划分的时候，需要区分 μ 子和噪音，对噪音的计算需要进一步的研究。大亚湾实验不仅需要 RPC 模块测量的 μ 子位置分辨，还需要 RPC 模块对 μ 子的重建效率。重建效率跟探测器噪音和

效率都有关系，这方面还需要进行细致的研究。

大亚湾中微子实验即将进行取数。实验中用 RPC 模块铺成地毯式阵列来测量 μ 子，不再进行符合测量验证模块的效率。将来实验中可以使用模块内部 4 层 RPC，做相互测量，给出各层的探测效率，以此来跟高能所地面测量的数据对比，同时还可以进行长期的探测器稳定性监测，研究 RPC 探测器老化过程。

此外，大亚湾三个实验点覆盖不同的岩石，使得各个实验点宇宙线 μ 子的能量不同，在远点可达百 GeV。望远镜 RPC 和底部地毯式阵列 RPC 联合以其 2 度的角分辨和 $\sim 100\%$ 的 μ 子探测效率，在即将来临的太阳第 24 周期活动峰年之际，其有望找到百 GeV 太阳高能事件，在太阳高能粒子研究领域取得新的突破性进展。

参考文献

- [1] Z.Z. Xing, plenary talk given at ICHEP2008; Int. J. Mod. Phys. A 23, (2008) 4255
- [2] J. Chadwick, Verh. d. D. Phys. Ges. 16, (1914)383.
- [3] W. Pauli, letter to Tübingen conference, December 4, 1930; L.M. Brown, Phys. Today 23, Sept. 1978.
- [4] E. Fermi, Ricerca Scientifica 2, 12 (1933).
- [5] K.-C. Wang, Phys. Rev., 61 (1942): 97.
- [6] 王淦昌, 各种基子之发现及其性能, 《科学世界》16, (1947): 233–240.
王淦昌, 微中子问题的现阶段, 《科学世界》19(4), (1950): 89–94.
- [7] "Detection of the Free Neutrino: A Confirmation", C.L. Cowan, Jr., F. Reines, F.B. Harrison, H.W. Kruse and A.D. McGuire, Science 124, 103 (1956)
- [8] T.D. Lee and C.N. Yang, Phys. Lett. 104, 254 (1956).
- [9] C.S. Wu, et al., Phys. Lett. 105, 1413 (1957).
- [10] R.P. Feynman and M. Gell-Mann, Phys. Rev. 109,193 (1958); E.C.G. Sudarshan and R.E. Marshak, Phys. Rev. 109, 1860 (1958).
- [11] L. Landau, Nucl. Phys. 3, 127 (1957); T.D. Lee and C.N. Yang, Phys. Rev. 105: 1671 (1957).
- [12] G. Danby, J.M. Gaillard, K. Goulianos, L.M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz and J. Steinberger, Phys. Rev. Lett. 9, 36 (1962).
- [13] S.L. Glashow, Nucl. Phys. 22, 579 (1961); S Weinberg, Phys. Rev. Lett. 19, 1264 (1967).
- [14] P.W. Higgs, Phys. Lett. 12, 132 (1964); Phys. Rev. Lett. 13, 508 (1964); Phys. Rev. 145, 1156 (1966).
- [15] G.t. Hooft, Nucl. Phys. B 33, 173 (1971); Nucl. Phys. B 35, 167 (1971); G.t. Hooft and M.J.G. Veltman, Nucl. Phys. B 44, 189 (1972).
- [16] F.J. Hasert et al., Phys. Lett. B 46, 121 (1973); A.C. Benvenuti et al., Phys. Rev. Lett. 32, 800 (1974); G. Arnison et al., Phys. Lett B 122, 103 (1983).
- [17] DONUT Collaboration, K. Kodama et al., Phys. Lett. B 504, 218 (2001), hepex/ 0012035.

- [18] B. Pontecorvo, Sov. Phys. JETP 6, 429 (1957); Sov. Phys. JETP 7, 172 (1958); Z. Maki, M. Nakagawa and S. Sakata, Prog. Theor. Phys. 28, 870 (1962).
- [19] B. Pontecorvo, Sov. Phys. JETP 26, 984 (1968); V.N. Gribov and B. Pontecorvo, Phys. Lett. B 28, 493 (1969); S. Eliezer and A.R. Swift, Nucl. Phys. B 105, 45 (1976); H. Fritzsch and P. Minkowski, Phys. Lett. B 62, 72 (1976); S.M. Bilenky and B. Pontecorvo, Sov. J. Nucl. Phys. 24, 316 (1976).
- [20] The Super-Kamiokande Collaboration, Y. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. 81, 1562 (1998); Phys. Rev. D 71, 112005 (2005).
- [21] The K2K Collaboration, M.H. Ahn et al., Phys. Rev. D 74, 072003 (2006).
- [22] The MINOS Collaboration, P. Adamson et al., Phys. Rev. Lett. 101, 131802 (2008).
- [23] The SNO Collaboration, Q.R. Ahmad et al., Phys. Rev. Lett. 89, 011301 (2002); Phys. Rev. Lett. 92, 181301 (2004); Phys. Rev. Lett. 101, 111301 (2008).
- [24] J.N. Bahcall, W.A. Fowler, I. Iben and R.L. Sears, Astrophys. J. 137, 344 (1963); J.N. Bahcall, M.H. Pinsonneault and S. Basu, Astrophys. J. 555, 990 (2001); J.N. Bahcall and M.H. Pinsonneault, Phys. Rev. Lett. 92, 121301 (2004).
- [25] The KamLAND Collaboration, S. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 100, 221803 (2008).
- [26] Kamiokande-II Collaboration, K.S. Hirata et al., Phys. Lett. B 205, 416 (1988); Phys. Lett. B 280, 146 (1992); Kamiokande Collaboration, Y. Fukuda et al., Phys. Lett. B 335, 237 (1994).
- [27] D. Casper et al., Phys. Rev. Lett. 66, 2561 (1991); R. Becker-Szendy et al., Phys. Rev. Lett. 69, 1010 (1992); Nucl. Phys. Proc. Suppl. 38, 331 (1995).
- [28] R. Davis, D.S. Harmer and K.C. Hoffman, Phys. Rev. Lett. 20, 1205 (1968); The Homestake Collaboration, B.T. Cleveland et al., Astrophys. J. 496, 505 (1998).
- [29] Particle Data Group, C. Amsler et al., Phys. Lett. B 667, 1 (2008).
- [30] Daya Bay Collaboration, arXiv: hep-ex/0701029, 2007
- [31] M.H. Ye, T.D. Lee et al., "Neutrino Physics in the Daya Bay Era" Workshop on 4-5 Nov., 2010, Beijing.
- [32] A. Maki and M. Nakagawa and S. Sakata, Prog. Theor. Phys., 1962, v28: 870
- [33] B. Pontecorvo, Sov. Phys., 1968, JETP26: 984
- [34] B. Kayser, "Neutrino Mass, Mixing, And Flavor Change", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 33 (2006) 156
- [35] F. Boehm and P. Vogel, "Physics of massive neutrinos", Cambridge University Press, Cambridge, 1987, P87; B. Kayser, Phys. Rev. D24, 110 (1981); Y. Grossman and H. Lipkin, Phys. Rev. D55, 2760 (1997)

- [36] 参考当前版的大亚湾中微子实验建议书: http://dayawane.ihep.ac.cn/internal/proposal/DYB_proposal_v3.3.pdf
- [37] H. Fritzsch, Zhi-zhong Xing, Phys. Lett. B 517 (2001) 363 – 368
- [38] C. Jarlskog, Phys. Rev. Lett. 55, 1039 (1985); D. D. Wu, Phys. Rev. D33, 860 (1986)
- [39] arXiv:0910.2984v2, [nucl-ex], 9 Jun. (2010);
S. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 100, 221803(2008).
- [40] B.Aharmim et al., Phys. Rev. Lett. 101, 111301(2008).
- [41] D.G. Michael et al., [MINOS Collab.], Phys. Rev. Lett. 97, 191801(2006).
- [42] Y. Ashie et al., [Super-K Collab.], Phys. Rev. Lett. 93, 101801(2004); Y. Ashie et al., Phys. Rev. D71, 112005(2005).
- [43] M.H. Ahn et al.,[K2K collab.], Phys. Rev. D74, 072003(2006).
- [44] M. Apollonio et al., Phys. Rev. Lett. B466, 415(1999); Eur. Phys. J. C27, 331(2003).
- [45] M. Goodman, “Introduction to Three-Neutrino Mixing Parameters Listing”, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 33, 493 (2006).
- [46] V. Barger, D. Marfatia and K. Whisnant, Phys. Rev., D65, 073023 (2002) [arXiv:hep-ph/0112119]
- [47] V. Barger, P. Huber, D. Marfatia and W. Winter, arXiv:hep-ph/0703029.
- [48] Thomas Schwetz et al., arXiv:0808.2016v3, [hep-ph], update in 11 Feb (2010).
- [49] Carlo Bemporad, et al., Rev. of Mod. Phys. V74, 297, 2002
- [50] F. Reines and C. L. Cowan, Phys. Rev. 92, 830 (1953)
- [51] G. Fogli et al., Phys. Rev. D66, 010001 (2002) 406; K. Eguchi et al., Phys. Rev. Lett. 90, 021802 (2003)
- [52] G. L. Fogli et al., Phys. Rev. D66, 053010 (2002)
- [53] Krasnoyarsk: V. Martemyanov et al., hep-ex/0211070
Bugey: Y. Declais et al., Nucl. Phys. B434, 503 (1995)
ILL: H.Kwon et al., Phys.Rev.D 24, 1097 (1981)
Goesgen: G. Zacek et al., Phys.Rev.D 34, 2621 (1986)
Rovno: A. I. Alfonin et al., JETP 67, 213 (1998)
KamLand: K. Eguchi et al., Phys. Rev. Lett. 90, 021802 (2003)
- [54] <http://www.hep.anl.gov/minos/reactor13/white.html>
- [55] 2008年大亚湾中微子实验的技术设计
<http://dayabay.bnl.gov/private/documents/tdr/tex/tdr2008.pdf>
- [56] Jiawen Zhang et al., Nucl. Instr. and Meth. A580(2007) 1250-1256.

- [57] Y. Xie, et al., HEP & NP 31 (1) (2007).
- [58] The BESIII detector, IHEP-BEPCII-SB-13, IHEP, Beijing
- [59] 谢一冈等. 粒子探测器与数据获取. 北京: 科学出版社, 2003.
- [60] 谢宇广. 2007年中国科学院研究生院博士论文, “BESIII μ 探测器的研制与离线刻度”.
- [61] 刘金昌. 2008年中国科学院研究生院博士论文, “大亚湾反应堆中微子实验的中子本底的研究”.
- [62] 路浩奇. 2009年中国科学院博士论文, “大亚湾反符合水契伦科夫探测器及其模型的研究”.
- [63] BaBar Collaboration, Nucl. Instr. and Meth. A, 2002, **479**: 1
- [64] BELLE Collaboration, Nucl. Instr. and Meth. A, 2002, **479**: 117
- [65] 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
- [66] ALICE Collaboration, CERN/LHCC 99-22, 13 August 1999
- [67] ATLAS Muon Collaboration, CERN/LHCC 97-22, 5 June 1997
- [68] CMS Collaboration, CERN/LHCC 97-32, 15 December 1997
- [69] Zhen Cao, The ARGO-YBJ Experiment Progresses and Future Extension, arXiv:1006.4298
- [70] G. Di Sciascio, for the ARGO-YBJ Collaboration, Physics Results from the Argo-YBJ Experiment, arXiv:0811.0997.
- [71] G. Aielli, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 562 (2006) 92.
- [72] 马烈华. 2010年中国科学院博士论文, “大亚湾中微子实验中的RPC 探测器”, 第五章.
- [73] R. Santonico, R. Cardarelli. Nucl. Instr. and Meth. A 187 (1981) 377
- [74] Ma LieHua et al, Chinese Physics C, 2010, 34(8): 1116
- [75] Liehua Ma et al., "The Mass Production and Quality Control of RPCs for the Daya Bay Experiment", will be publised in NIM
- [76] Jun Cao, Shengpeng Jiang Daya Bay DocDB393
- [77] Jilei Xu, Daya Bay DocDB3072
- [78] Jun Cao, Daya Bay DocDB300
- [79] A.Garfagnini, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 572 (2007) 177

- [80] Zhang Jiawen, Long strip performance, Daya Bay DocDB1101.
- [81] Changguo Lu, Proposal for using long readout strip on RPC system, TechNote, Daya Bay DocDB1136.
- [82] 杨述武等. 普通物理实验(第三版)力学热学部分. 北京: 高等教育出版社, 2002, 92页.
- [83] Kwong Lau, Mechanical robustness of RPCs, Daya Bay DocDB1078.
- [84] Atlas Collaboration, ATLAS RPC Production Readiness Review Documentation, Daya Bay DocDB1030.
- [85] 关梦云. 2006年中国科学院研究生院博士论文, “大亚湾反应堆中微子实验本底研究和模型研制”, 3.3.2节.
- [86] Luis Barrera, Kwong Lau, Daya Bay DocDB 1421
- [87] Yang Heng et al., FEC FDR and ROT/RTM/ROM PDR Report, Daya Bay DocDB 2432.
- [88] Y. F. Wang, et al., Phys. Rev. D62, 013012 (2000)
- [89] <http://dayabay.ihep.ac.cn> <http://dayabay.ihep.ac.cn/DocDB/0005/000543/001/dayabay06.ppt>
- [90] 关梦云, 2006年中国科学院研究生院博士论文, “大亚湾反应堆中微子实验本底研究和模型研制”, 第三章.
- [91] Liang Hao, RPC ReadOut Electronics, Daya Bay DocDB5238, 2010.
- [92] Heng Yang et al., IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, **57**: 2371
- [93] 黄隆锦等, 核电子学与探测技术, 第29卷, 第5期, 2009, 1136页
- [94] 袁苑等, 核电子学与探测技术, 第29卷, 第4期, 2009, 769页
- [95] 占亮, 2009年中国科学院研究生院博士论文, “大亚湾中心探测器模拟和物理灵敏度的研究”, 第三章.
- [96] 钟玮丽, 2008年中国科学院研究生院博士论文, “大亚湾中心探测器模型和 ΔM_{31}^2 测量精度的研究”, 第六章.
- [97] H. Jokisch, K. Carstensen, et al., Phys. Rev. D19, 1368 (1979)
- [98] H. Jokisch, K. Carstensen, et al., Phys. Rev. Lett. 83, 4241 (1999)
- [99] L3 Collaboration, P. Achardv, O. Adriani, et al., Phys. Lett. B598, 15 (2004)
- [100] B.C. Rastin, J. Phys. G10, 1609 (1984)
- [101] C.A. Ayre, J.M. Baxendale, et al., J. Phys. G1, 584 (1975)
- [102] K. Nakamura et al. (Particle Data Group), J. Phys. G 37, 075021 (2010), 'cosmic ray' section.

- [103] Mengyun Guan et al., Muon simulation at the Daya Bay site, Daya Bay DocDB318.
- [104] Changgen Yang, Equipment and Installation Drawings, Daya Bay Engineering Doc11.
- [105] <http://srtm.csi.cgiar.org/>
- [106] J. Kremer, et al., PRL 83, 4241(1999).
- [107] PRD 76,052003 (2007)
- [108] M. Bahmanabadi et al, PRD 74, 082006 (2006)
- [109] M. Boezio et al, PRD 67,072003 (2003)
- [110] J. J. Beatty et al, PRD 70 092005(2004)
- [111] M. Yamada, et al., PRD 44 617, 1991
- [112] PLB 598(2004) 15-32
- [113] S. Matsuno et al, PRD 29(1984)
- [114] J.M.LoSecco, Phys. Rev. D59 (1999) 117302.
- [115] David E. Jaffe, Physics with stopping muons in Daya Bay, Daya Bay DocDB 2232.
- [116] T. Suzuki and D. F. Measday, Physical Review C, 35 (1987) 2212.
- [117] N.C.Mukhopadhyay Phys. Rep. 30 (1977) 1.
- [118] Mu- capture data from B.B.Balashov, G.Ya.Korenman, P.A.Eramgan Atomizdat, 1978
- [119] Jilei Xu et. al., Enlarging Map and Simulation, Daybay DocDB3072.

图例索引

1.1 $\Delta\chi^2$ 随 $\sin^2\theta_{13}$ 的变化曲线	8
1.2 反应堆中微子的能谱和反 β 衰变的反应截面 [49]	9
1.3 过去的反应堆中微子实验总结	10
2.1 大亚湾核电站的实景图片	13
2.2 大亚湾反应堆中微子实验的实验点设置和反应堆位置示意图	15
2.3 反中微子实验厅整体结构示意图	16
2.4 反中微子探测器模块结构示意图	17
2.5 中微子信号产生示意图	18
2.6 探测器反符合系统近点示意图	21
2.7 RPC 模块摆放结构示意图。	21
2.8 大亚湾实验预期灵敏度	22
3.1 RPC 结构示意图	26
3.2 RPC 裸室在模块内部的 4 种不同摆放方式	31
3.3 模块内部裸室不同叠放方式对效率的影响	32
3.4 不同叠放方式在 3/4 模式下的效率比较	32
3.5 不同匹配电阻对信号的影响	34
3.6 回旋读出条	34
3.7 回旋条下不同匹配电阻时的信号	35
3.8 模块内部气体的流通过路线	36
3.9 模块形变测试实验	37
3.10 RPC 裸室形变示意图	38
3.11 模块内部结构详细示意图	39

3.12 模块内部结构简化示意图	40
3.13 RPC 电子学读出示意图	40
3.14 裸室生产流程	41
3.15 读出条刻录机	43
3.16 气管信号线在前面板走线	44
4.1 RPC 裸室的宇宙线测试系统示意图	47
4.2 在测量环境下裸室在8000V高压时效率、单计数和暗电流的统计分布	48
4.3 模块测试系统	49
4.4 气体流通示意图	50
4.5 气体混合面板	51
4.6 气体分配面板	51
4.7 气体保护瓶	51
4.8 每道气体流速图	52
4.9 RPC 电子学系统示意图	52
4.10 电子学测量系统模型	53
4.11 FEC工作流程图	54
4.12 USB-ROM FPGA 逻辑框图	55
4.13 分配盒滤波电路示意图	55
4.14 模块信号	57
4.15 不同读出条的单计数	57
4.16 读出条和 RPC 室的位置关系	58
4.17 相邻道的 talk 比率	59
4.18 非相邻道的 Cross talk	60
4.19 闪烁体符合测量实验	61
4.20 模块自触发面积的选取	61
4.21 触发延时和 RPC 效率对应的关系	63
4.22 不同的数据处理逻辑下效率的变化	63
4.23 模块振动实验	64
4.24 振动三个方向的加速度	64
4.25 模块振动前后3/4效率的比较	65

4.26 模块025不同通气下效率变化	65
4.27 模块效率坪曲线	67
4.28 单模块的小块效率	68
4.29 64 个小块的排列分布示意图	69
4.30 小块 2/4、3/4 效率的统计	70
4.31 模块 2/4、3/4 效率的统计	70
4.32 模块的通道计数对比	71
4.33 温度参数统计	72
4.34 湿度参数统计	72
4.35 大气压参数统计	72
4.36 工作气体下, RPC 效率跟 μ 子径迹长度的关系。	73
4.37 模块运往大亚湾	74
4.38 模块漏气率统计	75
4.39 纯氩、8000伏高压下裸室的漏电流统计。	76
4.40 纯氩、8000伏高压下裸室的体电阻统计。	76
4.41 纯氩、8000伏高压下信号波形。	77
5.1 修改后的Gaisser公式和低能地面 μ 子角分布对比	80
5.2 高低精度地图合并	81
5.3 实验大厅	82
5.4 扩充地图	83
5.5 SRTM数据和老地图的山形对比	83
5.6 不同地图数据合并后的结果	84
5.7 椭圆地球的影响	84
5.8 μ 子角分布	85
5.9 μ 子 θ 角分布	85
5.10 各点新老地图 μ 子样本对比	86
5.11 πk 模型	87
5.12 stop μ 子在大厅的初始能量	88
5.13 μ^- 在 C_{12} 上被俘获发射的中子谱	89
5.14 衰变电子谱	90

5.15 衰变电子信号	91
5.16 三种模块摆放结构示意图	94
5.17 模块的双层倾斜摆放方式示意图	94
5.18 远点模块在模拟软件中的几何	95
5.19 模块的倾斜叠放示意图	95
5.20 最初的模块设计	96
5.21 RPC 系统丢失的 μ 子位置分布	98
5.22 RPC 系统丢失的 μ 子位置分布2	98
5.23 μ 子穿过模块死区示意图	98
5.24 RPC 系统丢失的 μ 子角分布	99
5.25 模块中的垫片 (spacer)	100
5.26 模块内部 spacer 位置图	101
5.27 大亚湾各点 μ 子 ϕ 角分布	102
5.28 模块的倾角	102
5.29 三个实验点模块优化后的朝向	103
5.30 μ 子正好击中两个模块两层的 θ 角分布和位置分布	105
5.31 μ 子穿过模块间隙示意图	105
6.1 边上一个望远镜测得 μ 子 ϕ 角分布	109
6.2 两个望远镜的机械设计图	109
6.3 读出条位置分辨	110
6.4 μ 子角分布	110
6.5 μ 子角分布的分辨	111
6.6 变 bin 处理方法	111
6.7 对水池的监测	112
6.8 穿过望远镜 RPC 的 μ 子产生的中子位置分布	113
6.9 μ 子距离 AD 中心不同距离的分布	114
6.10 μ 子距 AD 中心不同距离的相对贡献	114
6.11 不同系统对中子本底的贡献	115
6.12 岩石中子的位置分布	116
6.13 μ 子距离 AD 中心不同距离的贡献。	116

6.14 μ 子距离 AD 中心不同距离的贡献	116
---------------------------------------	-----

表格索引

1.1 三代中微子混合条件下，最佳拟合值（Best fit）带 1σ 的误差和 2σ 、 3σ 间隔下中微子振荡参数的最佳拟合值。	8
2.1 几个反应堆中微子实验的反符合探测器的设计	19
2.2 各实验点的中微子探测器模块的事例数和噪音比率	22
3.1 不同触发模式下的 RPC 噪音水平、 μ 子有效触发率和由噪音引起的死时间	29
3.2 不同模块面积下的 RPC 噪音水平和近厅 μ 子有效触发率	30
4.1 闪烁体测量和自触发对比	62
4.2 自触发和外触发的对比	62
5.1 新老地图典型点高程差异表	82
5.2 μ 子模拟结果	85
5.3 μ^- 在不同核上俘获产生中子的几率	89
5.4 模拟得到 μ 的俘获数量	89
5.5 不同裸室效率下带死区的小块的效率	92
5.6 不同裸室效率模块单元的效率	92
5.7 高低效率裸室组合得到模块单元的效率	93
5.8 不同模块摆放间隙下远点 RPC 系统的整体效率	96
5.9 系统非效率在裸室两种摆放下的对比	100
5.10 考虑 spacer 之后，不同模块摆放间隙下远点 RPC 系统的整体效率	101
5.11 0、180 度旋转角时 RPC 系统效率	103
5.12 90、270 度旋转角时 RPC 系统效率	103
5.13 模块间的触发模式对系统效率的增加	104

6.1 中子在 AD 中有能量响应和被俘获的原始位置数量比	113
6.2 望远镜 RPC 测量中子本底在远近点的统计量	115

发表文章目录

- [1] Xu Jilei et al., “Design and preliminary test results of Daya Bay RPC modules”, have accepted by Chinese Physics C.
- [2] Lu Haoq, ..., Xu Jilei et al., “Circulation model for water circulation purification in a water Cerenkov detector”, CPC(HEP & NP), 2009, 33(7): 567-571.
- [3] Liehua Ma, ..., Jilei Xu et al., “The Mass Production and Quality Control of RPCs for the Daya Bay Experiment”, have accepted by NIM.

致 谢

能够在高能所攻读博士学位是我一生中最大的幸事之一。在五年多的学习生活中，我得到了很多老师、同学、朋友的支持和帮助。在这篇博士论文的结尾，我想用文字记录我的感受，以表达我衷心的感谢。

首先，诚挚感谢我的导师杨长根研究员。感谢杨老师这五年来对我的指导和关心。

杨长根研究员是一直都在指导我的老师。杨老师身在工作一线，专心科研，思维敏锐、为人谦逊、是一位很好的领导者。在此，我要忠心地感谢杨老师对我的关心和指导。

感谢张家文老师。张老师在 RPC 探测器方面有着深厚的经验，感谢张老师的指导和关心。感谢大亚湾 veto 组里的陈进老师，张清民师兄，马烈华师兄，谢宇广师兄等。

感谢大亚湾中心探测器组里老师和同学对我的支持和帮助，身在这样一个科研小组中，让我学会了许多东西。曹俊研究员拥有深厚的数据分析和探测器模拟功底，面对物理问题有清晰的思路，能够很快的抓住本质，感谢他对我在软件方面和对物理问题理解上的指导和帮助。王贻芳研究员身为大亚湾国际实验组的发言人，对中微子实验有着深厚的理论和实验经验，对科学研究有敏锐的洞察力，感谢他给我的影响。感谢王萌老师对我工作的帮助和指导。

感谢关梦云。4年来，与关师兄共同做实验，共同研究和讨论，关师兄在科研方面一丝不苟，工作上勤奋刻苦，任劳任怨，在生活方面，有条不紊，乐观向上。关师兄各方面都深深影响了我，在此表示深深地感谢。

我要感谢我的其他各位师兄师姐等对我的支持和帮助。他们是刘金昌、钟玮丽、王志民、路浩奇、王玲玉，有的和我一起做过硬件实验，共同工作，有的一起合作过软件研究，并经常相互讨论物理问题，从而受到很多启发，让我感受到相互的促进和合作是科学研究中很重要的精神。感谢韩玲老师在学习和生活上的帮助。

感谢美国普林斯顿大学的陆昌国教授。在气体系统方面的帮助和探讨，使我受益匪浅。感谢休斯顿大学的 Cullen 工程师、Kwong Lau 教授和其学生 Logan，还有捷克学生 Viktor 和其导师 Vit 等，在跟他们的探讨中，使我学到了很多。

感谢大亚湾国际合作组所有老师和同学。

感谢我的父母、亲人们，我的一切都来自于他们对我的培育之深情。快乐生活、努力工作是我报效他们的唯一方式。

最后感谢我的女友。在科研探索道路上，一直给我最大的支持和鼓励，在生活上，一直给予深深的关心。

