第1章　实验介绍

(曹俊，李玉峰)

1.1　总体科学目标

1.1.1.1 研究背景

构成物质世界的最基本的粒子分为夸克（quark）和轻子（lepton）两大类。夸克有上（u）、下（d）、粲（c）、奇异（s）、顶（t）、底（b）六种，和他们的反粒子。轻子有电子（e）、缪子（μ）、陶子（τ）、相对应的电子中微子(νe)、μ中微子（νμ）、τ中微子（ντ）三种中微子，以及相应的反粒子。人们对这些基本粒子及其相互作用已经有了相当深入的了解，所构建出的在量子场论框架下、基于量子色动力学和弱电统一理论的标准模型（SM）被一系列高精度的实验所证实。特别是2012年，标准模型最后一个基本粒子--希格斯玻色子--在欧洲核子中心的大型强子对撞机LHC实验发现，标志着粒子物理标准模型的全面成功。而另一方面，一些实验和理论的证据表明存在超出标准模型的新物理效应，特别是，中微子振荡和质量起源问题、暗物质和反物质起源问题等方面的证据需要新物理的理论来解释。

中微子物理学的研究最早可以追溯到 1930 年 W. Pauli 提出的中微子假说【PAULI】。W. Pauli 基于 beta 衰变中能量守恒的需要，提出 beta 衰变中存在未被实验探测到的中微子。此后经过 20 多年的寻找，1956 年，C. Cowan 和 F. Reines 首次观测到核反应堆产生的反电子中微子事例【COWAN】，证明中微子作为基本粒子的存在性。1962 年，Brookhaven 国家实验室的交变梯度同步加速器(Alternating Gradient Synchrotron，AGS)首次证实 μ 型中微子的存在【AGS】。2000 年，Fermi 实验室的 DONUT 实验证实存在 τ 型中微子【DONUT】。

中微子振荡的概念最早由B. Pontecorvo提出【PT1957】。如果中微子具有非简并的质量并且轻子间存在味混合效应，不同类型的中微子之间就可以发生相互转化。这种现象被称为中微子振荡。中微子振荡可以用两个质量平方差\Delta m^2_21和\Delta m^2_31，三个混合角theta(12), theta(23), theta(13)以及一个CP破坏相位角delta_CP来描述。其中质量平方差决定振荡的频率，混合角决定振荡的幅度，CP相位角决定电荷宇称对称性的破坏程度。三代中微子的混合矩阵被称为MNSP矩阵【PDG】，可以参数化为三个矩阵的乘积：

$$U=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23}\\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\cos\theta_{13} & 0 & e^{-i\delta}\sin\theta_{13}\\ 0 & 1 & 0\\ -e^{i\delta}\sin\theta_{13} & 0 & \cos\theta_{13}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0\\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}$$

其中第一项theta(23)与大气中微子振荡相关，第三项theta(12)与太阳（KamLAND）中微子振荡相关，第二项theta(13)和delta_CP与反应堆中微子和长基线加速器中微子振荡相关。

科学家对太阳中微子、大气中微子、加速器中微子和反应堆中微子的振荡行为进行了长久的搜寻。直到1998年，日本的Super-Kamiokande实验【SK1998】首次证实大气中微子振荡现

象的存在。2002年左右，SNO 【SNO】和KamLAND 【KamLAND】等实验解决了长期存在的太阳中微子丢失的问题，最终确认太阳中微子传播过程中存在振荡现象。2012年，以我国的大亚湾反应堆中微子实验【DYB，DC，RENO】首次观测到由theta(13)引起的不同于太阳和大气中微子模式的振荡现象，并给出了混合角theta(13)的首次精确测量。迄今为止，科学家已经通过中微子振荡测量到两个独立的质量平方差和三个非零的混合角，最新的全局拟合结果（最佳值和1-sigma区间）如表1.1所示：

	Delta_m^2_21 (10^{-5} eV)	|Delta_m^2_31| (10^{-3} eV)	sin^2_th(12)	sin^2_th(13)	sin^2_th(23)
Fogli et.al.	7.54 ± 0.26	2.48(2.36) ± 0.07	0.308 ± 0.017	0.023 ± 0.002	0.425 ± 0.028
Maltoni et.al.	7.45 ± 0.19	2.43(2.35) ± 0.06	0.306 ± 0.012	0.023 ± 0.002	0.444 ± 0.037
Valle et.al.	7.62 ± 0.20	2.55(2.43) ± 0.08	0.320 ± 0.016	0.025 ± 0.003	0.612 ± 0.031

表 1.1 五个已知中微子振荡参数的最新实验全局拟合值。默认情况为正序的中微子质量顺序的结果，第二行括号对应逆序的质量顺序的情况。数据来自于【GF1,GF2,GF3】。

迄今为止，中微子振荡实验还有两个未知的物理参数有待测量，包括中微子的质量顺序和轻子CP破坏相位。测量中微子质量顺序就是确定|Delta_m^2_31|的符号，这代表了中微子质量谱的类型，可以通过反应堆中微子真空振荡和加速器中微子以及大气中微子振荡的物质效应来测量。设计中的实验包括我国的江门反应堆中微子实验JUNO【JUNO】和韩国的RENO-50【RENO50】。加速器中微子实验NOvA【NOvA】、LBNE 【LBNE】，以及大气中微子实验INO 【INO】和PINGU 【PINGU】。轻子CP破坏效应是解释宇宙中物质反物质不对称性的关键条件之一，需要通过长基线加速器中微子振荡来测量。包括正在运行的实验T2K【T2K】和NOvA，以及设计中的实验T2HK【HK】和LBNE。

1.1.1.2 实验介绍

江门中微子实验的首要物理目标是通过精确测量反应堆中微子的能谱来确定中微子质量顺序以及精确测量中微子的振荡参数。此外还进行其它多项科学目标前沿研究，包括超新星中微子、地球中微子、太阳中微子、大气中微子观测以及核子衰变等方面。

江门中微子实验将建于具有岩石覆盖的地下实验大厅，实验将建设一个有效质量为2万吨的液体闪烁体（液闪）中心探测器，以及相配套的反符合水契仑柯夫探测器和径迹探测器。中心探测器是探测中微子的主要工具，需要2万吨基于线性烷基苯的低本底高透明度液闪，以及15000个20英寸的高量子效率光电倍增管。中心探测器的能量分辨率要求达到前所未有的3%水平($\sigma/E = 3\%/(E)$ 【JUNO】。为屏蔽宇宙线产生的本底，岩石覆盖需要达到700米，反符合水契仑柯夫探测器用以屏蔽岩石的放射性带来的本底，并且和顶部的径迹探测器一道作为μ子探测器来标记穿过探测器的μ子的径迹。本实验的关键技术挑战包括高量子效率光电倍增管和高性能液闪的研制，低本底、高可靠性的中微子探测器的建造以及高精度的探测器刻度系统建造等方面。

江门中微子实验对中心探测器3%能量分辨率的要求是实验设计中的关键技术指标之一。需要在光电倍增管的覆盖率和量子效率、液闪的光产额和衰变长度等方面提出严格要求，具体的各项指标如下所示：

（1）光电倍增管的覆盖率达到80%，

（2）光电倍增管的量子效率达到35%，

（3）液闪的衰减长度达到30 m，

（4）液闪的光产额超过10000 p.e./MeV（need confirmed）。

此外，测量超新星中微子、质子衰变、太阳中微子、大气中微子等物理目标需要其它方面的技术要求，比如测量质子衰变的信号需要电子学能够进行波形取样而且时间分辨率要达到2 ns，而如果要进行低能太阳中微子的研究则要求探测器处于极低的天然放射性本底环境，比如达到或接近Borexino的水平。

利用反应堆中微子测量中微子的质量顺序，需要精确测量振荡效应导致的中微子能谱的变化。理想情况下测量质量顺序的最优基线长度在Delta_m^2_21的振荡极大处，定量的计算如图1.1的左图所示【JUNO】。另一方面，因为液闪探测器无法分辨中微子的方向，所以不同反应堆到探测器的距离差别将会影响质量顺序的分辨能力，是实验基线优化的关键因素。如图1.1的右图所示。因此不同反应堆的基线差别要小于500米。以上两个因素是实验选址的重要指导原则，考虑阳江和台山十个反应堆的具体位置，以及50公里以外的地质和地理情况，经过详细的地质勘测,最终确定实验的选址在广东江门开平市金鸡镇、赤水镇一带的打石山。如图1.2所示。通过对反应堆和实验厅坐标位置的勘测可以得到他们之间的准确距离。表1.2给出了实验厅到十个反应堆的位置和功率分布情况【JUNO】。这构成了接下来计算质量顺序和其它物理目标分辨率的出发点。

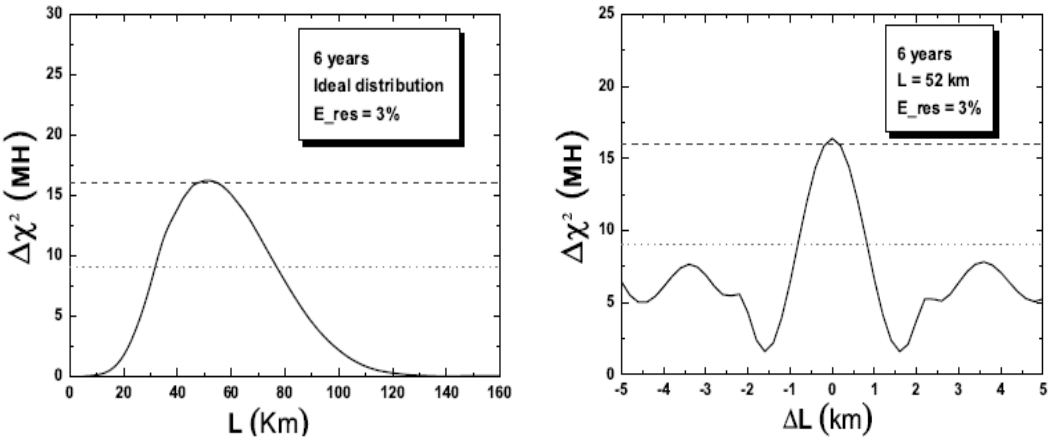


图 1.1　反应堆中微子实验测量质量顺序对基线优化（左图）以及反应堆基线距离的差别对分辨率的影响（右图）【JUNO】。

图 1.2　江门中微子实验的实验厅位于距离阳江和台山核电站大约 53 公里的打石山。

Cores	YJ-C1	YJ-C2	YJ-C3	YJ-C4	YJ-C5	YJ-C6
Power (GW)	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
Baseline(km)	52.75	52.84	52.42	52.51	52.12	52.21
Cores	TS-C1	TS-C2	TS-C3	TS-C4	DYB	HZ
Power (GW)	4.6	4.6	4.6	4.6	17.4	17.4
Baseline(km)	52.76	52.63	52.32	52.20	215	265

表1.2 江门中微子实验的实验厅到阳江和台山十个反应堆的距离和功率分布情况【JUNO】。此外最后两列还给出了大亚湾和惠州核电站到实验厅的距离。

1.1.1.3 物理目标

江门中微子实验的首要物理目标是利用反应堆中微子振荡测量未知的中微子质量顺序以及精确测量中微子振荡参数 theta(12)、\Delta m^2_21 和\Delta m^2_31。根据表 1.2 的反应堆功率和距离的分布情况，就可以计算对于中微子质量顺序以及振荡参数的分辨能力。

反应堆中微子振荡主要通过精确测量真空振荡的中微子能谱来对分辨中微子的质量顺序。其中反应堆中微子振荡可以用下面的公式表示【PDG】:

$$
\begin{aligned}
P(\bar{\nu}_e \to \bar{\nu}_e) = 1 \quad &- \quad 4|U_{e3}|^2|U_{e1}|^2 \sin^2 \Delta_{31} \\
&- \quad 4|U_{e3}|^2|U_{e2}|^2 \sin^2 \Delta_{32} \\
&- \quad 4|U_{e2}|^2|U_{e1}|^2 \sin^2 \Delta_{21} \, ,
\end{aligned}
$$

其中\Delta_ij = \Delta m^2_ij L/4 并且质量平方差之间满足\Delta m^2_31 = \Delta m^2_32 + \Delta m^2_21 的关系。从公式我们看到，虽然每一个单独的振荡项都只依赖于质量平方差的绝对数值，但由于正序的中微子质量顺序满足|\Delta m^2_31| > |\Delta m^2_32|的关系，而逆序的质量顺序满足|\Delta m^2_31| < |\Delta m^2_32|，因此不同的质量顺序在中微子能谱中存在本征的差别。这个差别代表了反应堆中微子对质量顺序的分辨能力。另外，因为

|\Delta m^2_31| ≅ 30|\Delta m^2_21|，所以探测器需要非常好的能量分辨能力才能够区分|\Delta m^2_31|和|\Delta m^2_32|之间微小的差别。这里我们在计算中取σ/E = 3%/(E)作为标准输入量。

定量的计算需要构造卡方函数作为提取物理目标分辨率的统计工具，包含实验统计和系统误差的卡方函数可以用以下的公式定义【JUNO】：

$$\chi^2_{\rm REA} = \sum_{i=1}^{N_{\rm bin}} \frac{[M_i - T_i(1+\sum_k \alpha_{ik}\epsilon_k)]^2}{M_i} + \sum_k \frac{\epsilon_k^2}{\sigma_k^2}\,,$$

其中 M_i 和 T_i 分别是探测器探测的反电子中微子事例的测量值和预测值，sigma_k 是实验的各类系统误差，简单起见，我们假定 2%的反应堆关联误差、0.8%的反应堆非关联误差、1%的探测器误差、以及 1%的能谱误差【JUNO】。此外，我们还假设 2%的能量非线性误差并且考虑探测器的自刻度效应【JUNO】。最后，我们使用 6 年运行的时间（300 天每年）、80%的中微子探测效率，以及最新的中微子振荡参数【GF1】作为标准输入量。基于此，我们就可以在三味中微子振荡框架下计算江门中微子实验关于中微子质量顺序的分辨能力。计算结果如图 1.3 的虚线所示。两种质量顺序的最佳卡方拟合值的垂直距离定义为中微子质量顺序的分辨能力：

$$\Delta\chi^2({\rm MH}) \simeq 11\,,$$

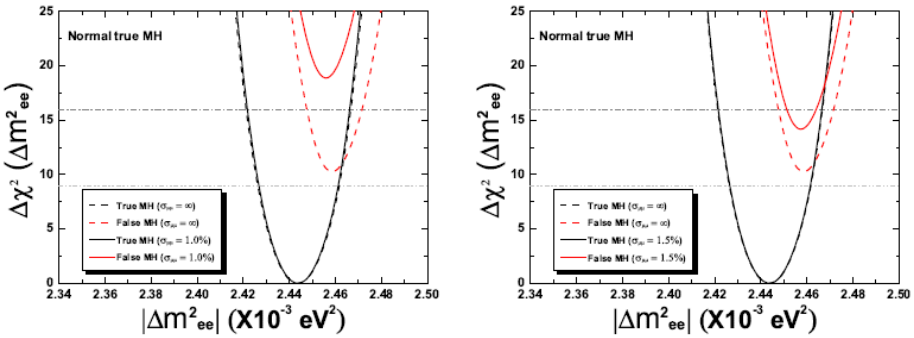


图 1.3 江门中微子实验中微子质量顺序的分辨能力。图中虚线代表只使用反应堆中微子能谱的相对测量信息，而实线代表引入1%（左图）或者1.5%（右图）的|\Delta m^2_mumu|测量精度【JUNO】。

其中电子味的有效质量平方差|\Delta m^2_ee|定义为：

$$\Delta m^2_{ee} \simeq \cos^2\theta_{12}\Delta m^2_{31} + \sin^2\theta_{12}\Delta m^2_{32}\,,$$

利用中微子的真空振荡性质，我们可以通过比较不同类型中微子振荡的有效质量平方差的绝对数值来区分中微子的质量顺序。江门中微子实验可以精确地测量电子味的有效质量平方差|\Delta m^2_ee|，因此引入长基线中微子消失实验对 μ 子味有效质量平方差|\Delta m^2_mumu|的测量精度可以很好地提高实验对中微子质量顺序的测量精度【JUNO】。其中有效质量平方差|\Delta m^2_mumu|定义为：

$$\Delta m^2_{\mu\mu} \simeq \sin^2\theta_{12}\Delta m^2_{31} + \cos^2\theta_{12}\Delta m^2_{32} + \sin 2\theta_{12}\sin\theta_{13}\tan\theta_{23}\cos\delta\Delta m^2_{21}\,,$$

计算结果如图 1.3 的实线所示。这里我们假设|\Delta m^2_mumu|的测量精度分别为 1%和 1.5%。到 2020 年左右，长基线加速器实验 T2K【T2K】和 NOvA【NOvA】分别对|\Delta m^2_mumu|的测量精度可以达到 1.5%左右，而联合分析 T2K 和 NOvA 的结果则有可能达到 1%的精度。

从图中可以看到 1%(1.5%)的测量精度可以提升中微子质量顺序分辨能力到：

$$\Delta\chi^2(\mathrm{MH}) \simeq 19(15)\,.$$

综上所述，江门中微子实验运行六年时间，通过中微子能谱的精确测量可以分辨中微子质量顺序到 3~3.5 sigma 的水平（卡方差值约为 11），而进一步加入加速器中微子消失实验有效质量平方差|\Delta m^2_mumu|1%的测量精度后，中微子质量顺序的分辨能力可以达到 4~4.5 sigma 的水平。

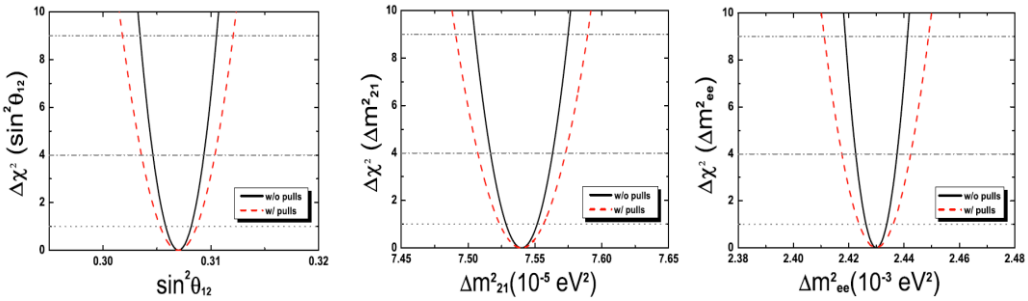


图 1.4 江门中微子实验分别对三个振荡参数theta(12)、 \Delta m^2_21和\Delta m^2_ee的测量精度。图中实线为单参数扫描的精度，而虚线为同时拟合三个振荡参数的精度。

接下来我们来讨论参数的精确测量。根据振荡公式，江门中微子实验可以测量全部 6 个振荡参数中的 4 个，包括 theta(12)、theta(13)、\Delta m^2_21 和\Delta m^2_ee。由于实验单探测器配置的特点，theta(13)的测量精度要低于大亚湾中微子实验的精度。所以下面我们直接讨论另外三个参数 theta(12)、 \Delta m^2_21 和\Delta m^2_ee。使用和前面中微子质量顺序相同的卡方函数和系统误差估计,我们得到三个参数的测量精度分别为 0.54%, 0.24%和 0.27%，如图 1.4 所示。其中实线代表单参数扫描的结果，虚线代表同时拟合三个振荡参数的拟合精度。此外通过变化能量分辨率、反应堆基线分布等参数，我们可以得知 theta(12)对反应堆基线的差别比较敏感，在理想的等基线情况下可以达到 0.35%的精度；而\Delta m^2_ee 对能量分辨比较敏感，分辨率为 5%时其精度为 0.5%左右。此外，我们还研究了背景水平、能谱误差、能量线性和非线性误差等因素对测量精度的影响。所有的结果总结在如下的表 1.3 之中，第一列的标准精度为图 1.4 的精度，第二列是加入 1%的能量非关联误差后的测量精度，第三列是加入背景后的测量精度，第四列和第五列分别是加入 1%的能量线性和非线性误差后的测量精度。

	Nominal	+B2B(1%)	+BG	+1.0% (EL)	+1.0% NL
$\sin^2\theta_{12}$	0.54%	0.60%	0.62%	0.64%	0.67%
Δm^2_{21}	0.24%	0.27%	0.29%	0.44%	0.59%
Δm^2_{ee}	0.27%	0.31%	0.31%	0.35%	0.44%

表1.3 江门中微子实验分别对三个振荡参数theta(12)、 \Delta m^2_21和\Delta m^2_ee的测量精度。第一列的标准精度为图1.4的精度，第二列为加入1%的Bin-2-Bin非关联误差后的测量精度，第三列是加入背景后的测量精度，第四列和第五列分别是加入1%的能量线性和非线性误差后的测量精度。

综上所述，在假设合理的误差条件下，江门中微子可以精确地测量六个中微子振荡参数中的三个，测量精度可以达到 0.5%-0.7%，比现在的测量精度要提高一个量级。基于此，我们可以检验混合矩阵第一行的幺正性到达 1%的水平。这将进一步限制超出标准模型的新物理在低能中微子振荡出现的可能性，这包括非标准的相互作用、惰性中微子、洛仑兹破缺等方面。

除了反应堆中微子振荡的研究，江门中微子实验在中微子物理学、天文学和地球物理学等方面有丰富的物理目标。

首先，江门中微子实验的大型地下探测器为我们探测超新星爆发的中微子提供了独特的机遇。超新星爆发大约有 99%的能量以中微子形式在 10-30 秒的时间内发射出来，产生大量不同能量、不同味道的中微子。因此超新星爆发是天体物理中中微子的重要来源之一。以位于距离地球 10 kpc、尺寸为 SN1987A 大小的超新星为例【SN】，江门中微子实验的探测器可以在反 beta 衰变（IBD）、原子核的带电流和中性流以及弹性散射等多个反应道探测到大量的中微子事例，具体的事例数总结如下表 1.4 所示，表中分别是 IBD 事例、中微子与炭核的带电流相互作用（ES）事例、中微子的弹性散射（ES）事例以及中微子与炭核的中性流相互作用（NC）事例。

(numbers need update)

Channels	IBD	CC (B*)	CC (N*)	ES	NC
Events	4500	60	80	200	250

表1.4 江门中微子实验中心探测器对距离地球10 kpc、尺寸为SN1987A大小的超新星爆发探测到的中微子事例数。

利用探测到中微子事例能谱、时间、味道分布等方面的知识，我们可以进行很多中微子物理和超新星物理方面的研究。首先，利用IBD事例的能量和时间信息可以限制反电子中微子的绝对质量。利用不分bin的最大似然估计的统计方法，我们可以得到中微子绝对质量在95%置信水平的测量上限为 0.75±0.23 eV（median ±1σ）。其次，通过各个振荡道的联合分析，我们可以拟合不同味道的中微子束流的测量精度，特别是可以测量中微子与反中微子的通量比、电子味和其它味中微子的通量比等物理量的精度，从而有可能区分不同的中微子振荡和超新星爆发方面的相关机制。最后利用中微子的能谱信息，我们还可以研究中微子质量顺序、中微子在超新星内部和地球的物质效应、中微子振荡的集体效应等方面丰富的物理内容。

其次，超新星爆发中微子的探测需要耐心等待银河系内部或附近超新星的爆发，但是历史上所有超新星爆发后残余的中微子背景则是宇宙中确定存在的中微子源。江门中微子实验以其巨大的探测器质量和良好的背景排除能力在超新星背景中微子探测方面有非常强的竞争力。考虑反应堆中微子、大气中微子以及宇宙线产生的背景，我们可以对主流的超新星背景中微子模型预测的中微子通量达到xx σ-yy σ的探测能力(need input)。这将对我们理解历史上恒星的形成、宇宙的演化等方面有重要的意义。

第三，质子衰变和其它重子数破坏过程是大统一理论存在最直接的证据之一，是所有地下大型低本底实验的重要目标。质子衰变到K^+和反中微子的过程，是超对称大统一理论预测的主要特征信号道，也正好是液闪探测器的优势所在。探测器可以通过波形的特征来观测K^+动能及其衰变产物构成的多重信号，从而压低大气中微子以及宇宙线μ子产生的背景，实验运行10年，此衰变道在90%的置信水平可以限制质子寿命到2.5×10^{34} 年(need updates)。此外，探测器还可以测量其它的重子数破坏过程。

第四，地球中微子是研究地球内部结构以及热核形成的重要工具。江门中微子实验探测

器可以每年可以观测到750个地球中微子事例，对应于37TNU单位。影响地球中微子观测的关键因素是减小反应堆中微子和其它背景的带来的减除误差。（need more discussion on the ability of Mantle-crust separation and discrimination for geo-physical models）

第五，江门中微子实验通过研究大气中微子的振荡可以测量中微子质量顺序、theta(23)以及轻子CP破坏相位等中微子振荡参数。初步的估计显示，江门中微子实验可以达到与SK类似的分辨率。比如运行10年时间，theta(23)的测量精度约为10%，中微子质量顺序和轻子CP破坏的分辨能力在1 σ-2 σ左右。(Numbers need updates)

第六，液闪探测器可以利用中微子与电子的弹性散射测量低能太阳中微子。江门中微子实验探测器每天可以产生3000个Be7中微子、120个pep中微子以及14个pp中微子产生的弹性散射事例（1万吨的有效体积）。这些中微子事例的可观测性依赖于相应的能量范围内放射性纯度达到的水平。此外，液闪中的C13与中微子的带电流反应可以构成关联事例（阈值为2.2MeV）。江门中微子实验探测器每年可以探测大约150个此种事例，从而可以检验太阳中微子MSW共振机制中物质振荡到真空振荡的转化区域。(Numbers need updates)

最后，其它方面的物理目标。

1.1.1.4 科学意义

江门中微子实验有丰富的物理目标，因此也具有广阔与深远的科学意义。这里我们着重强调测量中微子质量顺序和精确测量混合角theta(12)等振荡参数的物理影响。

中微子质量顺序的测量对中微子物理学、天文学和宇宙学研究中有重要的意义。

首先，中微子质量顺序的确定是测量轻子CP相位的先决条件。利用加速器中微子测量轻子CP破坏相位的方法存在参数简并的问题。中微子质量顺序的不同会导致两个不同的CP相位拟合值，从而大大增加实验测量CP相位的难度。此效应特别对于中等基线、物质效应较小的加速器中微子实验更为显著。因此，江门中微子实验使用不依赖于轻子CP相位的方法独立测量中微子质量顺序对加速器中微子测量CP相位的实验设计有重要的指导作用。

其次，中微子质量顺序的确定对无中微子双beta衰变的实验的设计具有指标性作用。无中微子双beta衰变是检验轻子数是否守恒、确定中微子的基本性质（中微子是Dirac粒子或Majorana粒子）最可行的实验途径。在标准的三味中微子振荡理论中，不同的中微子质量顺序对无中微子双beta衰变的寿命的预测有显著的不同，如图1.5所示【Dbeta】。逆序的质量顺序预测无中微子双beta衰变的中微子的有效质量大于1×10^{-2} eV ，而正序的质量顺序预测的中微子有效质量小于5×10^{-3} eV。所以确定中微子质量顺序对我们了解无中微子双beta衰变寿命的预测值，设计下一代实验的分辨能力有重要的指导意义。根据现有的技术条件，短时间内科学家只能探测逆序的质量顺序范围的无中微子双beta衰变的信号。

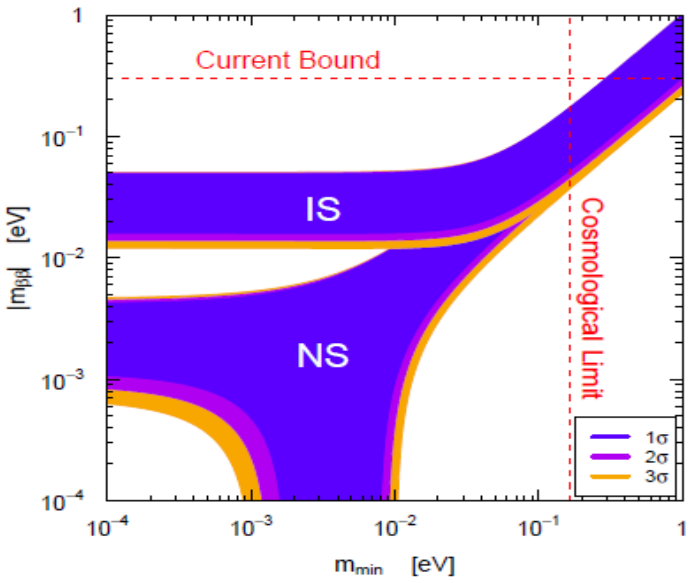


图 1.5　最新的中微子振荡拟合数据对无中微子双 beta 衰变的有效质量的预测值【Dbeta】，从中我们可以看到不同的中微子质量顺序带来的效应。

第三，中微子质量顺序也是中微子天文学和宇宙学相关研究的关键参数。不同的中微子质量顺序对于超新星中微子振荡和超新星核合成方面都有重要影响。首先，超新星中微子的集体振荡效应是验证中微子自相互作用的独特途径，而其独特的能谱分裂和交换现象【Split】只在逆序的中微子质量顺序情况才存在。其次，中微子质量顺序也会影响超新星核合成过程的元素丰度，比如超新星爆发产生的^{7}Li/^{11}B比率会因质量顺序的不同而有很大的改变【Kajino】。另一方面，中微子质量顺序也将影响未来利用宇宙学的观测数据推测中微子绝对质量的精度【Cosmos】，如图1.6所示。图中给出了不同的质量顺序对宇宙学的可观测量（中微子质量之和）的预测值，以及两种质量顺序情况下未来宇宙学观测数据相应的测量精度。

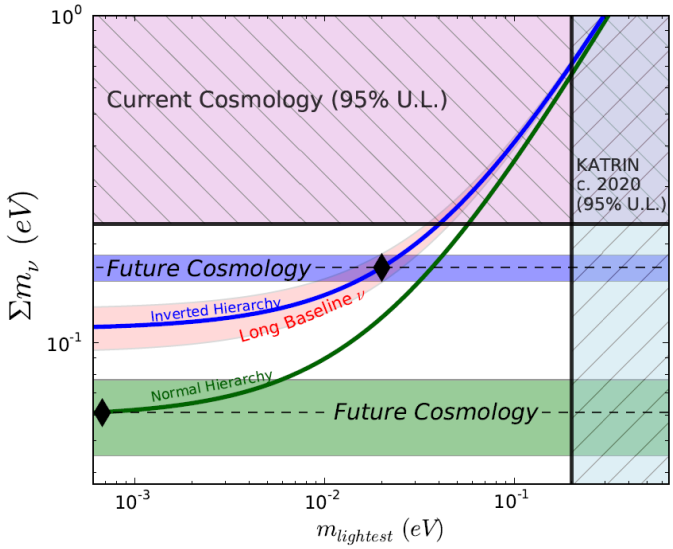


图 1.6　不同的中微子质量顺序对宇宙学的可观测量（中微子质量之和）的预测值，以及未来的宇宙学观测数据相应的测量精度【Cosmos】。

混合角theta(12)等振荡参数的精确测量对中微子物理的未来发展具有重要意义。

首先，\Delta m^2_21和theta(12)模式的中微子振荡是中基线反应堆中微子实验的独特优势。这种模式的振荡处于加速器中微子和大气中微子实验无法探测的区域，而太阳中微子由于本身的理论误差也无法进行精确测量。所以江门中微子实验对这两个参数0.5%-0.7%的测量精度在未来很长时间内都会处于世界领先的地位。此外，这两个参数的精确测量也将有助于更准确地反推太阳中微子源处的信息，更好地研究太阳内部的物理机制。

其次，精确测量混合角theta(12)对无中微子双beta衰变的研究也有重要的意义。逆序的质量顺序情况下无中微子双beta衰变有效质量的下限为：

$$|m_{\beta\beta}|_{\min}(\mathrm{IMH}) \simeq \cos^2\theta_{13}\sqrt{|\Delta m^2_{31}|}\cos 2\theta_{12}\,,$$

所以此下限强烈地依赖于theta(12)上限的变化。当theta(12)的精度从现在的水平提高到0.5%-0.7%时，有效质量下限可以提高2倍。这将更有助于无中微子双beta实验覆盖逆序质量顺序的全部参数空间【theta12】。相应地，如果要求有效质量的灵敏度提高2倍，则需要试验综合条件提高16倍（包括运行时间、探测器体积、背景水平和能量分辨率）。因此，theta(12)的精确测量对于更快地排除逆序的中微子质量顺序、或者排除中微子的Majorana属性有重要意义。

第三，精确测量混合角theta(12)对于鉴别中微子质量和混合模型有很大的帮助。因为\Delta m^2_21远远小于|\Delta m^2_31|，所以theta(12)相对另外两个混合角有更大的量子修正。因此精确测量theta(12)可以帮助我们鉴别这些模型是否满足实验要求。以三双最大混合（TBM）对theta(12)预测数值为例：

$$\theta_{12}^{\mathrm{TBM}} = \arcsin\frac{1}{\sqrt{3}} \simeq 35.3^\circ\,,$$

产生非零 theta(13)的同时也会修改对 theta(12)的预测值。文献中根据 theta(12)修正值的符号把大部分的主流模型分为 TM1 混合和 TM2 混合两大类【TM】，分别对应保持三双最大混合的第一列或第二列的结构不变，也就是 theta(12) 的预测值分别大于或小于 TBM 的预测值。因此这里 theta(12) 0.5%-0.7%的测量精度可以非常精确地区分这两类模型的真伪。

超新星中微子、地球中微子、太阳中微子等方面的研究中微子物理相关领域的发展同样具有重要意义。

1.1.1.5 国际竞争力

自从反应堆中微子实验测量到非零的 theta(13)之后，国际中微子物理实验研究的热点都集中到中微子质量顺序和轻子 CP 破坏相位的测量。CP 相位的测量需要利用加速器中微子实验，未来的主要实验包括日本的 T2HK 和美国的 LBNE。利用中微子振荡确定中微子质量顺序有三种不同的方法，包括反应堆中微子振荡的能谱测量、加速器中微子振荡 μ 子味到电子味转化几率的物质效应，以及大气中微子振荡 μ 子味消失几率的物质效应。代表性的实验包括：

（1）反应堆中微子实验：江门中微子实验和韩国的 RENO-50 实验；

（2）加速器中微子实验：美国的 NOvA 实验和 LBNE 实验；

（3）大气中微子实验：印度的 INO 实验和南极的 PINGU 实验；

前面我们已经介绍江门中微子实验测量中微子质量顺序的分辨能力，计划 2019 年开始运行。运行 6 年可以达到 3-4σ 的水平。RENO-50 计划建造 18kt 的液闪探测器，因为不清楚其设计的能量分辨率的水平，所以无法估计其对质量顺序的分辨能力。

长基线加速器中微子实验由于质量顺序和 CP 相位之间相互耦合，所以质量顺序的分辨能力需要考虑所有可能的 CP 相位的取值。NOvA 从 2014 年开始运行，到 2020 年有 40%的

可能性在 2σ 水平测量到质量顺序。LBNE 实验第一阶段（10kt）计划在 2025 年左右运行，运行 10 年可以在 3-6σ 水平确定质量顺序（依赖于 CP 相位）。

大气中微子实验束流本身的误差较大，需要更多的统计量和更好的角度分辨能力。INO 实验计划 2017 年开始运行，运行 10 年中微子质量顺序的分辨率可以达到 2.4σ。PINGU 实验计划 2020 年左右开始运行，其探测器的有效靶质量达到 Mt 量级，运行 4 年时间可以在 3σ 水平确定中微子质量顺序。

这里我们还需要强调的是反应堆中微子测量质量顺序有其独特的优势。与加速器中微子和大气中微子实验相比，反应堆中微子的测量不依赖于其它振荡参数的变化，可以独立地对质量顺序进行确定性的测量。加速器中微子实验的质量顺序测量依赖于未知的 CP 相位，而大气中微子实验的质量顺序测量则依赖于未知的 theta(23)象限选择与其具体取值。因此，反应堆中微子对质量顺序的测量具有不可替代的作用。其与另外两种方法构成了互补性的关系。最理想的情况是三种不同的方法对中微子质量给出一致性的测量。从而推动中微子物理实验研究的蓬勃发展。并且会对轻子 CP 相位等未知参数的测量提供有力的条件。

江门中微子实验对振荡参数\Delta m^2_21 和 theta(12)的精确测量有其独有的竞争力。这两个参数只能从中基线反应堆中微子和太阳中微子实验的获得。但是太阳中微子的理论误差较大，无法进行精确测量。所以江门中微子实验对\Delta m^2_21 和 theta(12)的测量在长时间内都会处于世界领先的地位。

江门中微子实验的液闪探测器对超新星中微子的测量，相比水切伦科夫探测器以及液氩探测器具有能量阈值低、分辨率好等方面的优势。(need updates)

综上所述江门中微子实验无论在测量中微子质量顺序还是精确测量振荡参数\Delta m^2_21 和 theta(12)方面在未来中微子物理的发展蓝图中都具有不可替代的地位。

1.2 探测器设计

江门中微子实验计划在地下 700 米的实验大厅建造一个 2 万吨低本底、高透明度的液闪探测器，探测器的基本概念如图 1.7 所示。

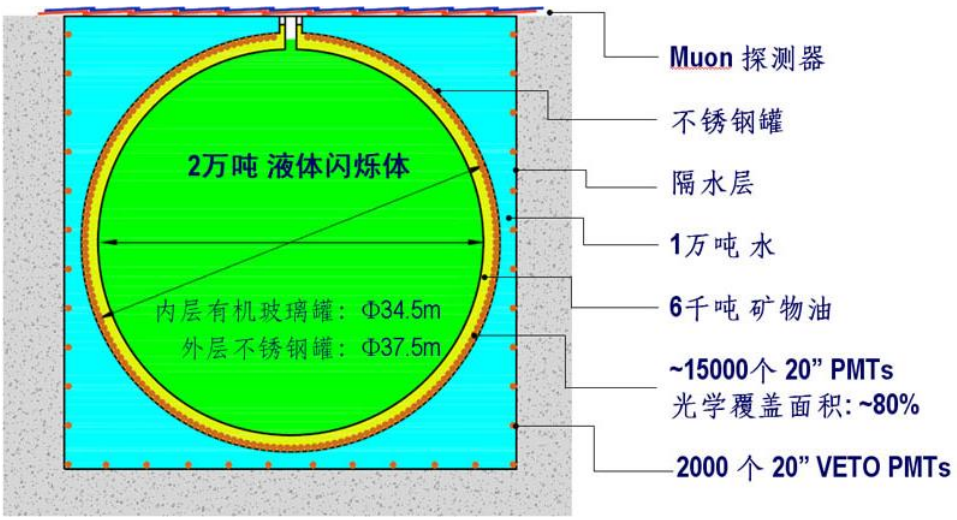


图 1.7 江门中微子实验 2 万吨的液体闪烁体探测器的概念设计图。

1.3 参考文献

【PAULI】W. Pauli, On the Earlier and more recent history of the neutrino, Pauli's lecture given in 1957 in Zurich. See for instance Writings on Physics and Philosophy, 193-218 (1994).

【COWAN】C Cowan, *et al.*, Detection of the free neutrino: A Confirmation, Science **124**, 103 (1956).

【AGS】G. Danby, *et al.,* Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos, Phys. Rev. Lett. **9**, 36 (1962).

【DONUT】K. Kodama, *et al.*, Observation of tau neutrino interactions, Phys. Lett. B **504**, 218 (2001).

【PT1957】B. Pontecorvo, Mesonium and antimesonium, Sov. Phys. JETP **6**, 429 (1957).

【PDG】J. Beringer, *et al,*. Review of Particle Physics (RPP), Phys. Rev. D **86**, 010001 (2012).

【SK1998】Super-Kamiokande Collaboration, (Y. Fukuda, *et al.*), Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos, Phys. Rev. Lett. **81**, 1562 (1998).

【SNO】SNO Collaboration, (Q. R. Ahmad *et al.*), Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory, Phys. Rev. Lett. **89**, 011301 (2002).

【KamLAND】KamLAND Collaboration, (K. Eguchi, *et al.*), First results from KamLAND: Evidence for reactor anti-neutrino disappearance, Phys. Rev. Lett. **90**, 021802 (2003).

【DYB】Daya Bay Collaboration, (F.P. An *et al.*), Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay, Phys. Rev. Lett. **108**, 171803 (2012).

【DC】Double Chooz Collaboration, (Y. Abe et al.), Indication for the disappearance of reactor electron antineutrinos in the Double Chooz experiment, Phys. Rev. Lett. **108**, 131801 (2012).

【RENO】RENO Collaboration, (J.K. Ahn et al.), Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment, Phys. Rev. Lett. **108**, 191802 (2012).

【GF1】F. Capozzi *et al.*, Status of three-neutrino oscillation parameters, circa 2013, arXiv:1312.2878 [hep-ph]..

【GF2】M.C. Gonzalez-Garcia, M. Maltoni, J. Salvado, T. Schwetz, Global fit to three neutrino mixing: critical look at present precision, JHEP **12**, 123 (2012); and update NUFIT 1.2 at http://www.nu-fit.org/.

【GF3】D.V. Forero, M. Tortola, J.W.F. Valle, Global status of neutrino oscillation parameters after Neutrino-2012, Phys. Rev. D **86**, 073012 (2012).

【JUNO】Y.F. Li, J. Cao, Y.F. Wang and L. Zhan, Unambiguous Determination of the Neutrino Mass Hierarchy Using Reactor Neutrinos Phys. Rev. D **88**, 013008 (2013).

【RENO50】S. B. Kim, Proposal for RENO-50: detector design and goals, International Workshop on "RENO-50" toward Neutrino Mass Hierarchy, Seoul, June 13-14, (2013).

【NOvA】NOvA Collaboration, (D. Ayres *et al.*), NOvA: Proposal to build a 30 kiloton off-axis detector to study nu(mu) to nu(e) oscillations in the NuMI beamline, hep-ex/0503053.

【LBNE】LBNE Collaboration, (C. Adams *et al.*), Scientific Opportunities with the Long-Baseline Neutrino Experiment, arXiv: 1307.7335 [hep-ex].

【HK】 HyperK Collaboration, (K. Abe et al.), Letter of Intent: The Hyper-Kamiokande Experiment: Detector Design and Physics Potential, arXiv: 1109.3262 [hep-ex].

【INO】A. Samanta, Phys. Lett. B **673**, 37 (2009); Phys. Rev. D **81**, 037302 (2010).

【PINGU】IceCube-PINGU Collaboration (M.G. Aartsen *et al.*), Letter of Intent: The Precision IceCube Next Generation Upgrade (PINGU) arXiv:1401.2046 [physics.ins-det].

【T2K】T2K Collaboration, (Y. Itow *et al.*), The JHF-Kamioka neutrino project, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 111, 146 (2001).

【SN】G. Pagliaroli, F. Vissani, M. L. Costantini, A. Ianni, Improved analysis of SN1987A antineutrino events, Astropart. Phys. **31**, 163 (2009).

【Dbeta】S. M. Bilenky, C. Giunti, Neutrinoless double-beta decay. A brief review, Mod. Phys. Lett. A **27**, 1230015 (2012).

【Split】G. G. Raffelt, A.Yu. Smirnov, Self-induced spectral splits in supernova neutrino fluxes, Phys. Rev. D **76**, 081301 (2007), Erratum-ibid. D **77**, 029903 (2008).

【Kajino】T. Kajino, G. J Mathews, T. Hayakawa, Neutrinos in core-collapse supernovae and nucleosynthesis, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **41,** 044007 (2014).

【Cosmos】 K.N. Abazajian *et al.*, Neutrino Physics from the Cosmic Microwave Background and Large Scale Structure, arXiv: 1309.5383 [astro-ph.CO].

【theta12】A. Dueck, W. Rodejohann, Kai Zuber, Phys. Rev. D **83,** 113010 (2011).

【TM】C.H. Albright, W. Rodejohann, Eur. Phys. J. C **62** (2009) 599.

第2章 中心探测器

中心探测器是通过反 β 衰变实现中微子探测的探测器，其主要建造任务包括：直径约 38m 不锈钢外层结构的设计建造，直径约 35m 内层结构的设计建造，约 15000 只 20 英寸高量子效率光电倍增管及其附属结构的测试安装，多种液体在探测器内外的灌装及长期循环等等。整个探测器不仅规模巨大，而且要求尽量保证闪烁光的传输和收集，以有利于达到 3%/√E 的能量分辨率；另外整个探测器建成后基本不可维修，所以要求其能够保证长期可靠稳定运行等。

实际工程建设中，由于现场操作空间的限制，不可能同时建造两个直径相差仅 3m 的球罐；若分开建造，在施工安全方面和时间进度上都存在极大的风险。因此，中心探测器的设计考虑如下两种主要技术方案、路线：一种是不锈钢网架+有机玻璃球方案，另外一种是不锈钢球罐+气球方案。其中第一种方案为目前的主要方案，将在此文档中做重点阐述。

2.1 不锈钢网架+ 有机玻璃球方案设计及研究

2.1.1 结构简介及设计要求

该方案中外层结构采用不锈钢双层网架结构，内层网架直径约为 38 米，外层网架直径约为 42 米；内层结构选用直径约为 35 米的有机玻璃球承载 2 万吨液体闪烁体，整个有机玻璃球通过一定数量的支撑杆连接固定于外层不锈钢网架上，不锈钢网架通过支撑柱固定在实验厅水池中。有机玻璃球与网架之间安装有约 15000 只直径 20 英寸的高量子效率光电倍增管用于探测中微子在液闪中产生的光信号。在网架上的光电倍增管后面，加装光隔离板，实现中心探测器和反符合探测器的光信号的隔离。在有机玻璃球顶部预留直径约 1 米的开口，作为刻度装置的安装接口。图 2-1 为中心探测器的结构示意。该方案中有机玻璃球外、即网架内外选用纯水作为屏蔽液体。

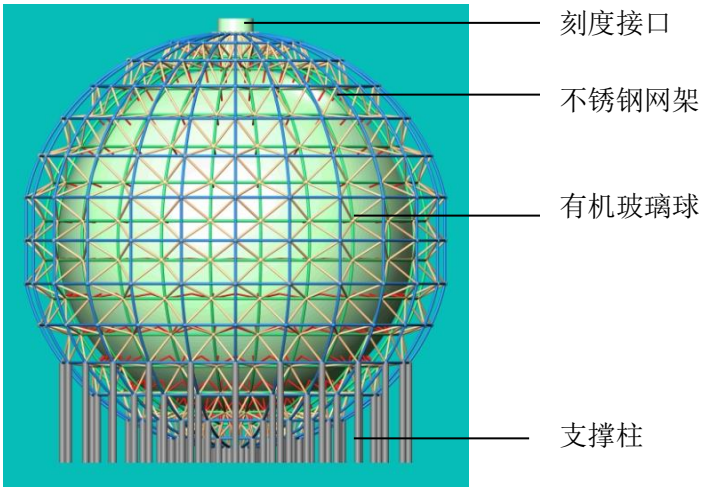


图 2-1 不锈钢网架+有机玻璃球方案示意图

中心探测器要求整个结构安全可靠、施工风险可控、实现长期稳定运行。设计中需要考虑不同时期多种工况下结构的受力及稳定性，这些工况包括有机玻璃球和网架建造过程中、有机玻璃球和网架建造完成后、PMT 安装完成后、探测器灌装过程中、探测器

长期运行中。

中心探测器的主要设计指标有：在不同工况下，考虑温度效应、地震荷载等作用，有机玻璃球结构可靠，密封良好，满足稳定性要求，总体应力水平不应超过 5MPa；不锈钢网架结构安全可靠，满足相关空间结构设计规范；有机玻璃球与不锈钢网架之间的连接结构可靠，对于局部失效响应不明显；探测器能稳定运行 20 年以上。中心探测器的结构设计同时要考虑现场施工的可行性和便捷性，尽可能缩短建造周期，减少成本。

2.1.2 不锈钢网架结构

由于网架结构具有重量轻、刚度大、工期短、抗震性能好等特点，所以选用不锈钢网架作为中心探测器的外层结构，该网架不仅要为内层有机玻璃球的固定提供支撑，同时在网架内侧还要安装有约 15000 个直径为 20 英寸的光电倍增管。在对不锈钢网架结构的设计中，需要在满足探测器使用功能的基础上，还要考虑到结构在不同工况下的承载能力及稳定性。

目前的网架材料选用奥氏体 316 不锈钢，主要参数为：密度 8.0g/cm^3；弹性模量 200GPa；泊松比 0.33；屈服强度 240MPa。

目前网架设计为双层螺栓球节点网架结构，呈正放四棱锥布置。选用这种形式的网架结构属于多次超静定空间结构体系，它改变了一般平面架结构的受力状态，能够承受来自各方面的载荷。这种壳形网架杆件规律性强，整体性好，空间刚度大，杆件之间全部采用螺栓连接，便于安装，操作简便，受力明确。按照目前的设计，内层网架球直径为 38.5 米，外层网架采用由两极向赤道逐层收缩式的结构形式，两极处网架直径为 42.5 米，在赤道处直径减小到 40.5 米。这种收缩式结构可以减小实验厅洞室的直径，从而减少土方量，降低实验厅建设成本。内层网架上设有 360 个节点通过连接撑杆将直径为 35.5 米的有机玻璃球固定于探测器中部。为改善连接撑杆上的受力状况，在外层网架的下半球也增加节点和连接撑杆与有机玻璃球进行连接，通过连接撑杆数量的增加以减小每根撑杆所受轴力，从而改善有机玻璃支撑点处的局部受力状况。内、外两层网架之间的节点用杆件通过螺栓球连接，而整个双层网架则通过下端一定数量的支撑柱固定于实验厅水池中央。网架的整体结构如图 2-1 所示，局部节点示意如图 2-2 所示。

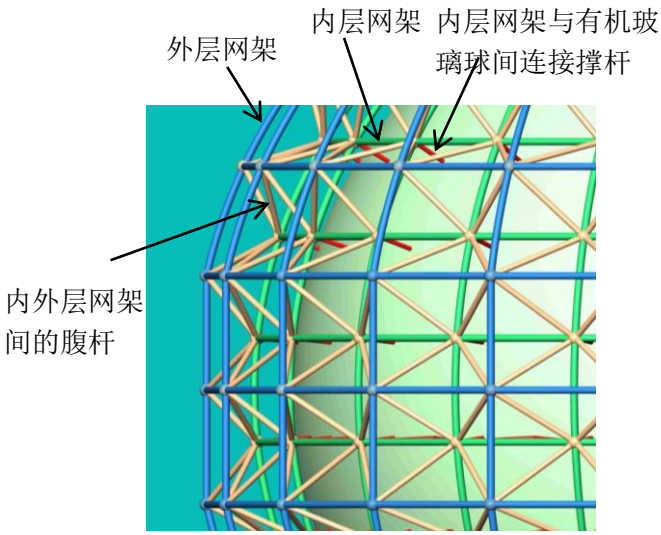


图 2-2 网架结构示意图

按照 JGJ7-2010 空间网格结构技术规程规定，网架中所涉及到的杆件的长细比均按照受

压杆件限值控制，即不大于 150。结合有限元分析结果及优化设计，各杆件尺寸初步确定如下：外层网架和内层网架的弦杆直径 273mm，壁厚 8mm；内外层网架之间的腹杆直径 219mm，壁厚 8mm；有机玻璃球与网架之间的连接撑杆直径为 102mm，壁厚 12mm；网架底部的支撑柱直径为 400mm，壁厚 20mm。

2.1.3 有机玻璃球结构

中心探测器内层结构为有机玻璃球结构，该球壳内径 35.5 米，主体壁厚 120mm，由多块有机玻璃板拼装、粘接而成，其示意图如图 2-3 所示，按照目前的初步方案，有机玻璃球体由 174 块有机玻璃板经本体聚合粘接而成；考虑生产工艺及运输要求，每块有机玻璃板的尺寸均小于 3m×8m。在有机玻璃球体顶部设置有一个开孔，作为液闪灌装通道以及刻度装置接口； 球体下端预留法兰孔，建造过程以及建造完成后可以作为球体清洗的排水孔，工作时用于液闪循环。

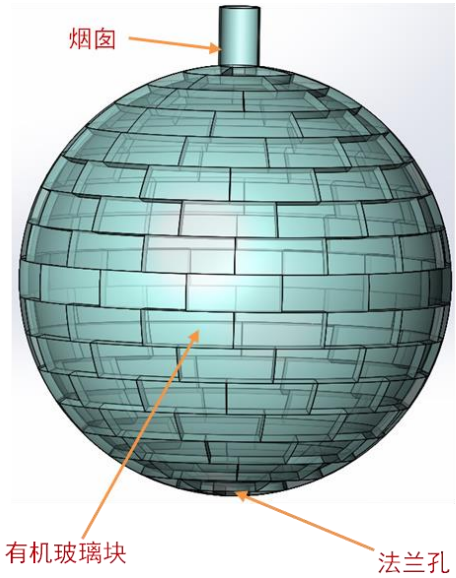


图 2-3 有机玻璃球示意图

2.1.4 有机玻璃球与网架连接结构

在本方案中，内层有机玻璃结构和外层不锈钢网架之间的连接结构借鉴了建筑行业玻璃幕墙的连接方式。每块机玻璃球分片上都设有不锈钢连接件和外层网架连为一体，有机玻璃球所受载荷通过连接件传递给外层网架，在传递载荷的同时，连接件自身也承受多种形式的载荷作用。本方案中，连接件与有机玻璃在局部采用铰接沉头式的节点形式，如图 2-4 所示。

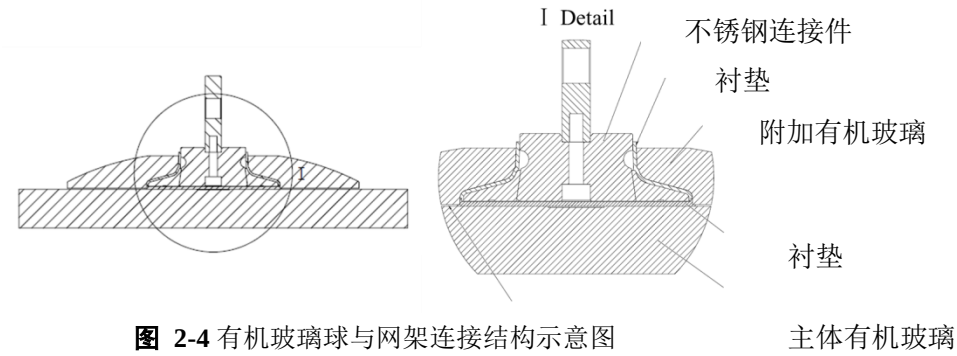


图 2-4 有机玻璃球与网架连接结构示意图

在该结构中，节点处的不锈钢连接件不穿过主体有机玻璃，而是预埋在主体有机玻璃外面的一块附加有机玻璃上，附加有机玻璃与主体有机玻璃通过本体聚合粘接在一起。主体有机玻璃厚度为 120mm，附加有机玻璃采用弧面形状，不仅外观较优，而且避免了方形存在尖角造成局部应力集中的现象，附加玻璃总厚度为 100mm。

2.1.5 中心探测器结构有限元分析及实验

2.1.5.1 结构整体有限元分析

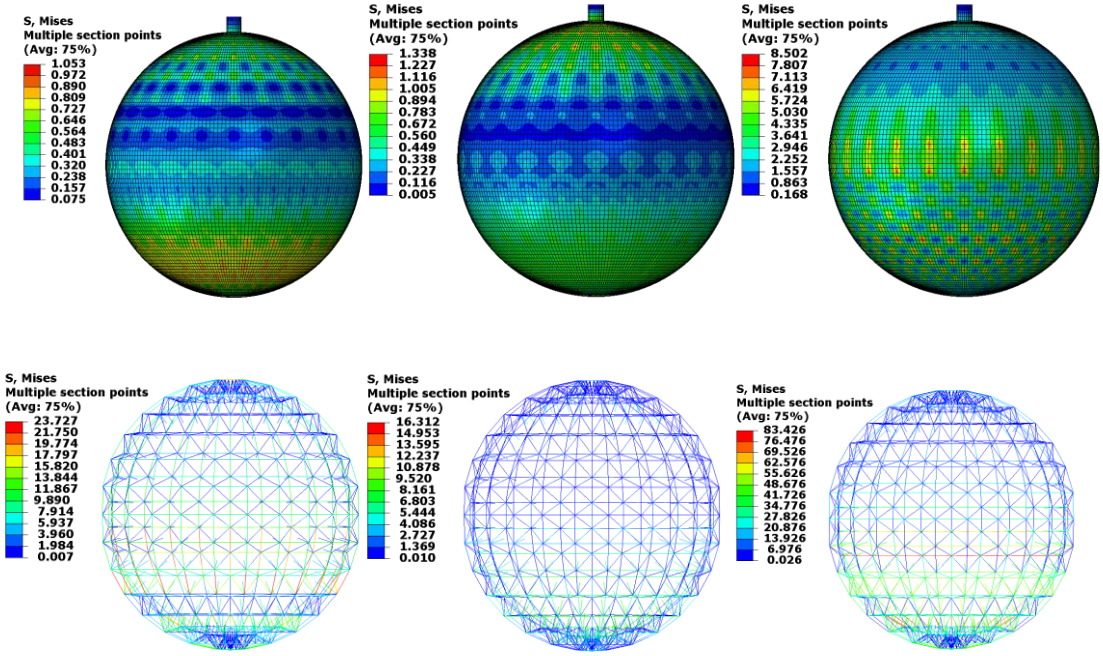
对于中心探测器结构，现阶段主要考虑并完成了三种工况下的有限元模拟计算，这三种工况分别为：自重工况；所有 PMT 安装到网架上后的工况；探测器安装完成且内外灌满液体，即最终运行工况。所有工况均考虑了荷载分项系数，下面计算中应力数值都取了永久荷载的分项系数 1.35。第一种工况下，荷载即施加重力加速度；第二种工况下，15000 个 PMT 总重量按照 1500kN 算，将 1500kN 平均分配到网架的内层节点上；第三种工况下，向球面施加线性分布的压力来模拟液体压强（ABAQUS 可实现），同时，PMT 总体浮力约 984 吨，将这部分浮力平均到连接杆与网架的连接节点上施加。目前，对这三种工况下的应力、变形和整体稳定性进行了有限元分析，并对地震载荷、温度及有机玻璃球内外液位差等影响因素进行了分析。各计算及分析结果如下：

(1) 应力计算

表 2-1 不同工况下最大应力和变形统计

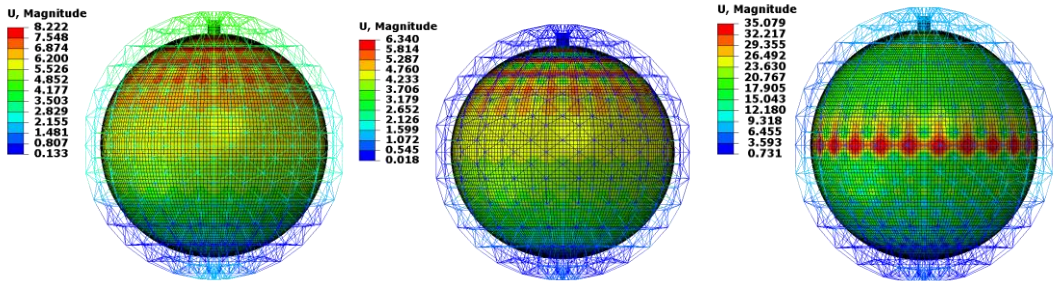
工况	球体最大应力 /MPa	网架最大应力 /MPa	整体结构最大变形/mm
1（仅重力）	1.1	23.7	8.2
2（重力+PMT）	1.3	16.3	6.3
3（重力+PMT+内外压）	8.5	83.4	35.1

由表 2-1 和图 2-5、2-6 记录的计算结果可以看到，在内外压作用的最终工况中，球体的最大应力为 8.502MPa，若不计 1.35 倍荷载系数，球体最大应力为 6.3MPa。在变形方面，结构底部最大变形约 35mm，约为球体跨度的 1/1014，满足 JGJ7-2010 空间网格结构技术规程要求。



工况一　　工况二　　工况三

图 2-5 有机玻璃球和网架在不同工况下的应力分布

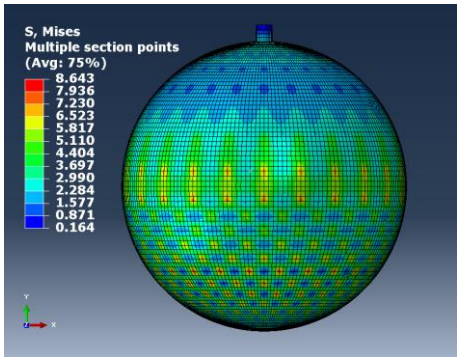


工况一　　工况二　　工况三

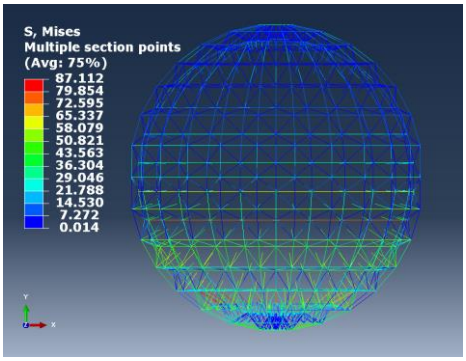
图 2-6 中心探测器整体变形计算结果

(2) 地震作用计算

江门地区属于 7 度抗震设防地区，地震载荷按照 0.1g 考虑，对地下 700m 的建筑而言已经十分保守了。将地震载荷加载到有限元模型中进行计算，在第三种工况，也就是中心探测器最终工作状态下，计算结果如图 2-7 所示。可以看出，在地震载荷作用下，有机玻璃球最大应力增加 1.6%，不锈钢网架最大应力增加 4.4%，变化并不明显，可以表明整体结构在地震作用下安全可靠。



(a) 有机玻璃球应力结果

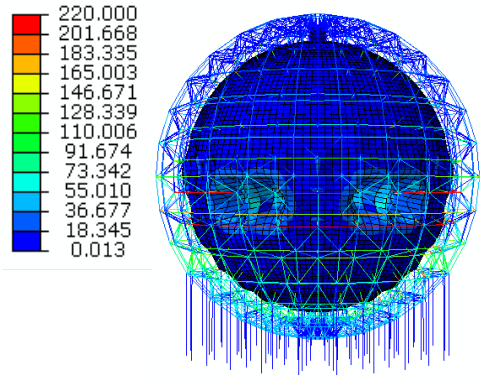


(b) 不锈钢网架应力结果

图 2-7 考虑地震作用下的计算结果

（3）整体稳定性验算

有机玻璃球单体的整体稳定问题较为突出，但在不锈钢网架的支撑下，整体结构的稳定性能将得到很大改善。为了准确地考察整体结构的稳定性，要对其进行考虑双非线性（即材料非线性和几何非线性）的稳定性计算，并引入整体结构的一阶弹性屈曲模态作为初始缺陷。由此，得到的失稳模态如图 2-8 (a)所示。取赤道带上有机玻璃球和支撑杆连接点的位移作为特征点变形指标，绘制特征点变形量-荷载系数曲线如图 2-8 (b)所示，可以得到稳定系数为 2.61，满足 JGJ7-2010《空间网格结构技术规程》中要求结构双非线性稳定系数大于 2.0 的要求。



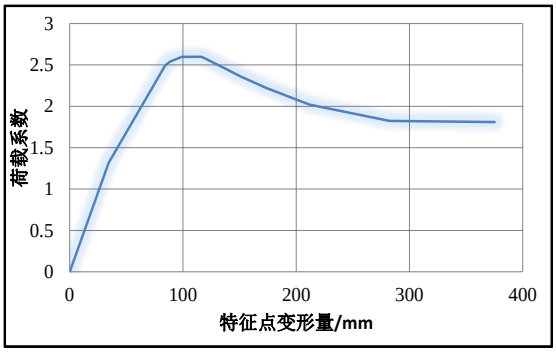


图 2-8（a）中心探测器失稳模态　　（b）特征点变形量-荷载系数曲线

（4） 内外液位差影响分析

有机玻璃球内外液位差影响有机玻璃球的内外压强差，从而影响有机玻璃球的受力状态。分别取内外液面高差（内-外）为-2m，1m，0m，1m，2m，3m，分别计算，结果如表 2-2 所示。可以看出，随着内部液面高差的升高，球体最大应力和支撑杆轴向应力明显降低，表明内部液面升高对于有机玻璃球的受力十分有利，在最终的结构设计中可以考虑尽可能地使有机玻璃球内部液闪的液位高于外部水的液位。

表 2-2 有机玻璃球内外液位差影响分析

液位差 H	球体最大应力	支撑杆轴向应力
-2m	10.2	67.7
-1m	9.4	61.6
0m	8.4	57.6
1m	7.4	53.7
2m	6.4	49.7

3m	5.6	46.5

（5） 温度效应计算

中心探测器在地下 700m 的环境内，温度变化较地面结构相对较小，但是由于不锈钢和有机玻璃的线膨胀系数存在差异，温度变化仍然需要重点考虑。因此，分别计算了中心探测器整体结构在升温 10 度和降温 10 度下的响应。在计算时，不锈钢线膨胀系数取为 1.2e-5，有机玻璃膨胀系数取为 7e-5。计算结果如表 2-3 所示。

结果表明，网架的应力值始终不超过 100MPa，其安全程度受温度变化的影响不大，不是结构设计的控制因素。对于有机玻璃球而言，升温对中心探测器中有机玻璃球的受力影响是有利的，而降温将造成有机玻璃球最大应力的增加。因此，在中心探测器运行过程中，应尽量避免产生降温过程。

表 2-1 升降温下结构应力比较

工况	有机玻璃球最大应力/MPa	网架最大应力/MPa
不考虑温度效应	8.5	83.4
升温 10 度	8.0	77.5
降温 10 度	10.1	95.0

(6) 结构可靠性分析

中心探测器的工作时间要求超过 20 年，在工作周期内有机玻璃球不能发生任何失效。对有机玻璃球+不锈钢网架支撑方案，薄弱点在于连接节点部位，某一节点甚至是某一些节点失效可能对整体结构带来的影响需要进行评估。针对本方案中探测器最终运行时的工况，对四种可能的失效进行了分析，这四种方式分别为：有机玻璃球最大应力对应的节点失效、有机玻璃球最大应力对应的纬度带的节点全部失效、下半球某一条经度带节点失效以及随机某几点失效。这四种情况下的有机玻璃球应力分布，如图 2-9 所示。

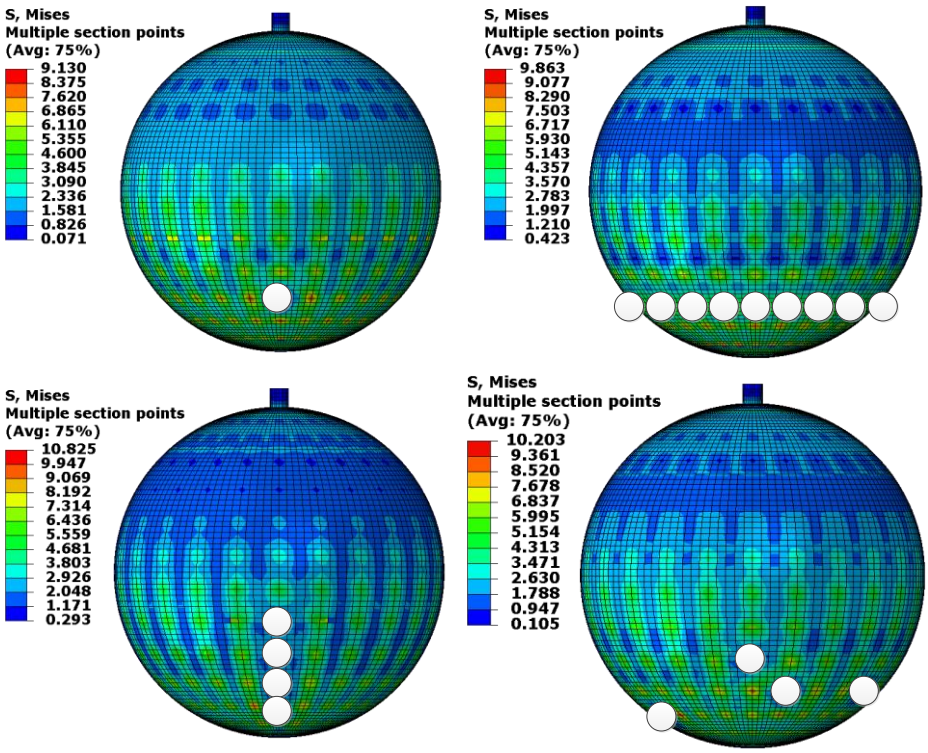


图 2-9 中心探测器失效分析

可以看出，在四种情况下，有机玻璃球最大应力增幅最大在 27.3%，达到 10.8MPa（去掉 1.35 倍荷载系数，为 8MPa）。而且，发生某一纬度带或某一经度带节点全部失效的可能性很小，最有可能发生的仅仅是某一节点失效，而这造成的应力变幅仅在 7%左右。这个结果可以证明，中心探测器的安全风险可控。

2.1.5.2 局部节点计算分析

有限元模型中网格的尺寸决定了计算结果的精度，尤其对模型中奇异点及其附近的计算结果影响很大。上文的整体计算结果显示，有机玻璃球的最大应力出现在支撑杆与有机玻璃球连接的部位，这个连接节点在有限元模型中是梁单元与壳单元垂直连接的一点，是一个典型的奇异点，前期计算分析表明整体计算中奇异点的计算结果是不够准确的，需要靠精细化的局部模型分析和试验进一步验证。

有机玻璃球与不锈钢网架连接节点示意图如图 2-10 所示。节点主要包括主体有机玻璃，附加有机玻璃，不锈钢紧固件三部分。

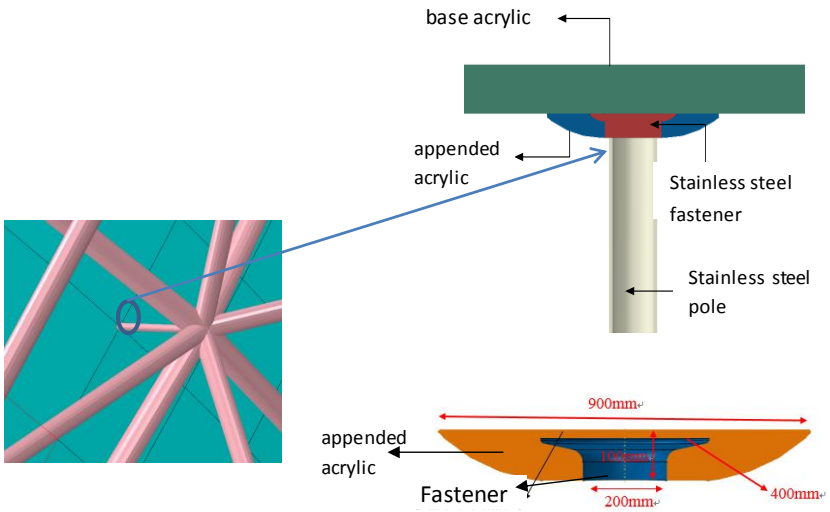
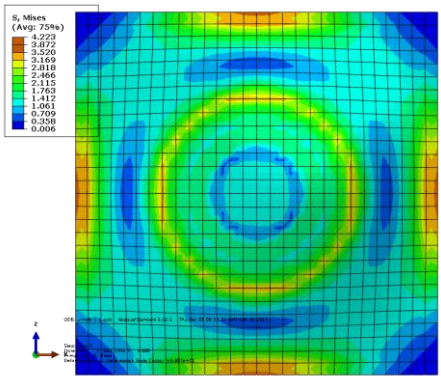
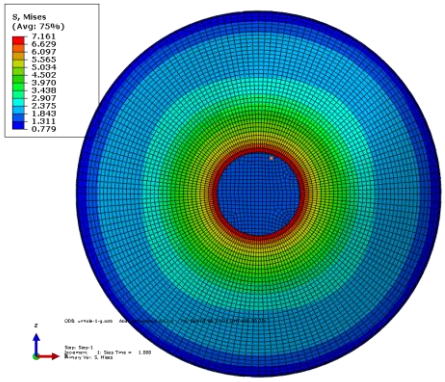


图 2-10 局部模型节点及尺寸示意图

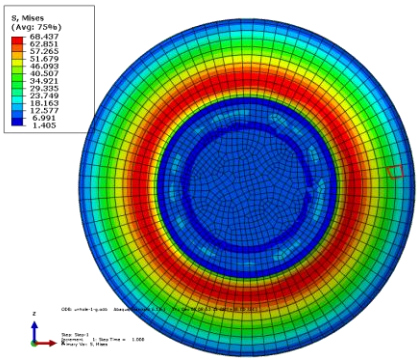
在整体模型的有限元分析中，有机玻璃球最大应力处对应的奇异点纬度方向和经度方向距离都约为 2.6m，故在局部模型中主体玻璃以 2.6m×2.6m 的直板考虑，厚度为 120mm；附加有机玻璃厚 100mm，底面直径 900mm，不锈钢紧固件下底面直径 400mm，上底面直径 200mm，如图 2-10 所示，以此建立实体单元有限元模型。有机玻璃的材料参数取值同整体模型。有限元计算中，按照整体模型中的最不利值，取拉杆荷载 14 吨计算。分别模拟了主体玻璃板为四边固结和铰接两种边界条件。四周固结的模拟结果如图 2-11 所示，四周铰接的模拟结果如图 2-12 所示。



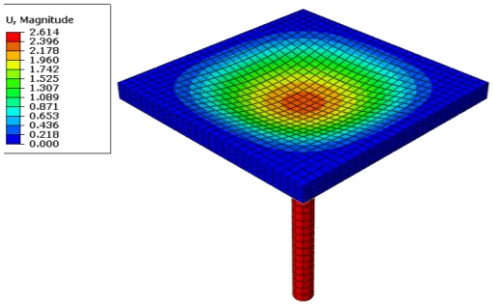
（a）主体有机玻璃应力分布
（最大值 4.2MPa）



(b)附加有机玻璃应力分布
（最大值 7.2MPa）

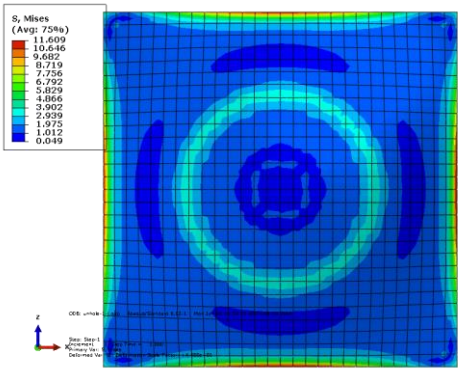


（c）不锈钢紧固件应力分布
（最大值 68.4MPa）

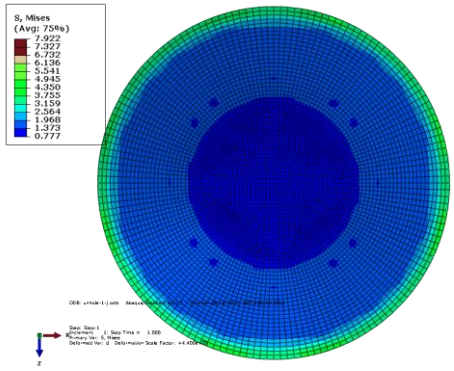


（d）节点模型位移分布
(最大值 2.6mm)

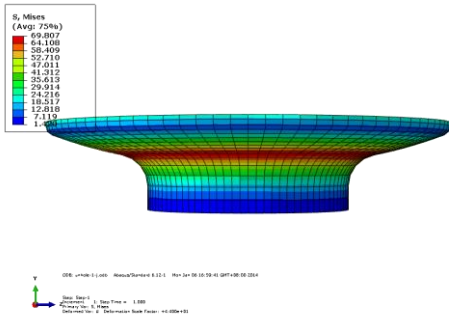
图 2-11 四周固结边界条件下局部节点模拟结果



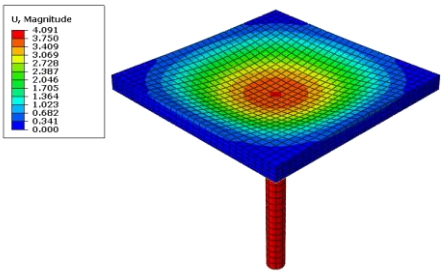
（a）主体有机玻璃应力分布
（最大值 11.6MPa）



(b)附加有机玻璃应力分布
（最大值 7.9MPa）



（c）不锈钢紧固件应力分布
（最大值 69.8MPa）



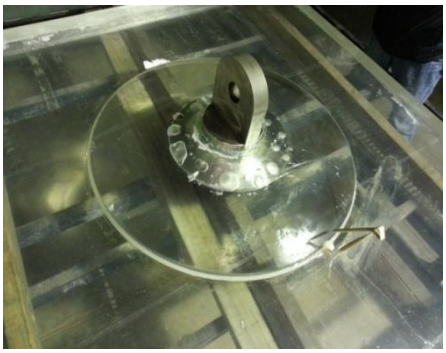
（d）节点模型位移分布
(最大值 4.1mm)

图 2-12 四周固结边界条件下局部节点模拟结果

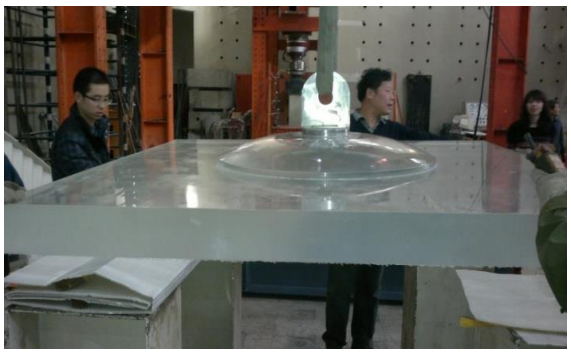
从计算结果来看，分别用固结和铰接边界条件模拟时，其应力变化都不大（主体玻璃上除外），附加玻璃应力铰接增大 9.6%，不锈钢紧固件应力铰接增大 1.9%，而主体玻璃上铰接增大了 63.6%，其主要原因是边界条件模拟时造成的边界应力集中，属于应力奇异单元，除去该约束边附近的单元，发现其铰接应力增大值不超过 10%。中心探测器实际受力情况处于固结和铰接之间，总体上有机玻璃上应力不超过 10Mpa。

2.1.5.3 局部节点模型试验

节点模型实验用于真实考察局部连接节点的承载能力、变形能力和破坏模式，为局部节点连接设计提供参考；并验证有限元建立精细模型的准确性，为进一步的参数分析提供依据。试件及试验过程如图 2-13 所示。



（a）有机玻璃试件



(b)试件安装

(c) 试验准备

（d）承载试验

图 2-13 节点模型试验

此次模型实验中应力、位移测量情况及结果如下：

将所有应变测点和位移测点的测量结果分别绘至图 2-14 和图 2-15 中。可以看出，所有测点结果均保持良好的弹性特征。在 14 吨拉力下，有机玻璃球最大单向应变不超过 1400 微应变(即 3.9MPa)，最大相对位移不超过 1mm。附加玻璃最大应力为 5.1MPa，出现在与紧固件颈区接触的部位；主体玻璃上表面最大应力为 4.5MPa，出现在与附加玻璃接触的边缘；主体玻璃下表面最大应力为 3.0MPa，出现在板面的中心。试验结果表明局部节点满足承载性能需求，安全可靠。

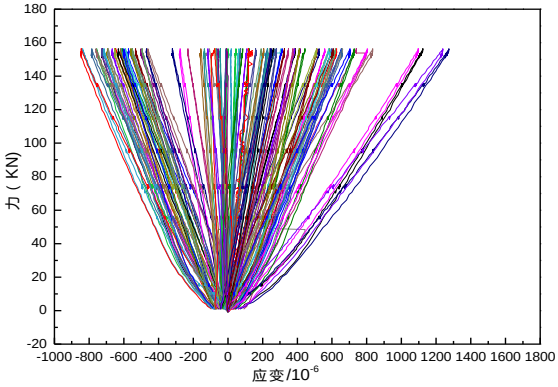


图 2-14 应变测点结果

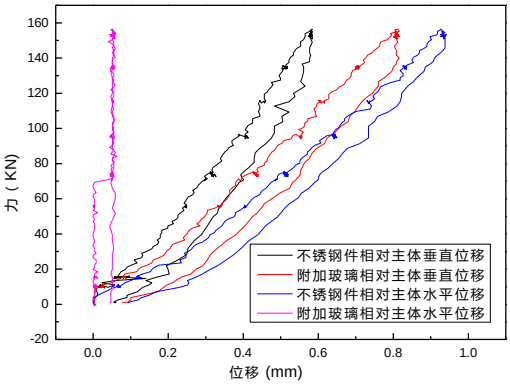


图 2-15 位移测点结果

将计算结果与试验结果进行对比，并将各部分最大值对比结果绘至图 2-16 中。可以看出，试验和有限元结果表现出一致性，最大值的差别在 18.9%以内，这种差别与试验约束装置的不平整有较大关系。总体而言，节点试验证明了局部节点有限元分析的合理性，表明可以利用局部节点的精细化有限元分析得到准确的应力结果。

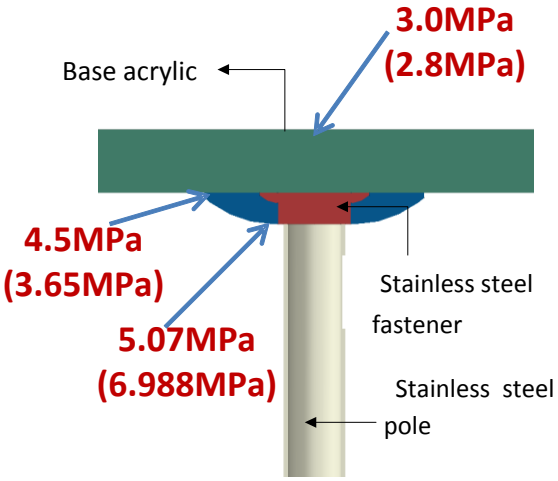


图 2-16 有限元计算与试验测量值对比

（括号中为有限元计算结果，括号外为试验测量结果。）

本节详述的局部节点试验验证了局部节点在 14 吨设计轴力下的长期安全性，同时验证了局部节点有限元分析的合理性，从而更加证明了整体结构方案的安全可靠。

2.1.6 有机玻璃材料性能研究

江门中微子实验中心探测器方案中，大量用到有机玻璃材料。有机玻璃材料在工作中会接触到液闪、烷基苯或水，因此对于有机玻璃材料的研究不仅要包括常规力学性能测试，还要对其与工作液体的兼容性、透光率以及耐久性能进行充分研究。目前阶段开展和完成的性能研究如下：

（1）常规力学性能测试

参照美国标准 ASTM-D638/ ASTM-D695/ ASTM-D790，分别进行了有机玻璃材料的拉伸、压缩、弯曲试验，得到其平均强度值分别为：68.2 MPa、108.3MPa、88.0MPa。另外，按照目前的方案，中心探测器中有机玻璃球的厚度约为 120mm，而有机玻璃单层板的厚度无法达到此厚度，在实际制作过程中需由 2-3 层板粘接而成，为了测试粘接层对有机玻璃强度的影响，对双层粘接板材料进行了拉伸和弯曲试验，其测得的强度分别为：66.7MPa、101.7MPa。

（2）有机玻璃在液闪中的高温加速老化试验

目前有一批试件已经完成试验，试验内容如下：将有机玻璃试件浸泡在液闪中，在 50℃、60℃、70℃的恒温箱下分别浸泡 30 天和 60 天，一段时间后将试件取出，进行拉伸、压缩、弯曲试验，并与常规试验下的强度值进行比较。试验结果表明，三种温度下浸泡 30 天，其拉伸、压缩强度变化不大，弯曲强度分别下降了 10.25%、12%、9.3%。在 50℃、60℃、70℃下浸泡 60 天，其拉伸强度分别下降了 12.7%,13.5%，19.1%；压缩强度基本无下降；弯曲强度分别下降了 15.2%、15.6%、19.8%。

本试验的目的是想通过高温加速试验得出高温老化的加速系数，从而推算出常温下的老化速率，但目前数据量较少，无法得出此系数，后续还会补充两组 90 天和 120 天的浸泡试件，来补充数据量，总结出老化规律。

（3）光固化粘接缝强度测试

中心探测器目前的方案中涉及到大量的有机玻璃本体聚合工作，常规的聚合方法耗时较长，目前厂家提出了两种新的固化聚合工艺。为了测定此工艺下有机玻璃的粘接强度，对粘接缝处的试件进行了拉伸试验，采用第一种新工艺得到的试件拉伸强度达到 46.5Mpa，而传统粘接方法测得的拉伸强度为 57Mpa。第二种固化工艺得到的试件还未进行测量。总之，新的工艺仍需要大量的实验数据证明其性能稳定可靠。

（4）液闪中长期荷载情况下是否产生银纹

在中心探测器中，有机玻璃受一定的载荷作用，并长期工作于液闪中。有机玻璃长期在液闪中受一定的应力作用下是否会产生银纹，甚至发展成裂纹？为此将有机玻璃试件浸泡在液闪中，采用四点弯方式进行加载，放置在室温和 60℃两种环境下，定期观察银纹发展情况。试验结果如下：

1）试件最大应力为 4.8MPa，常温下浸泡液闪 90 天，未产生银纹；

2）试件最大应力为 4.8MPa，常温下浸泡 30%三甲基苯+70%液闪 90 天，未产生银纹；

3）试件最大应力为 4.8MPa，60℃下浸泡液闪 30 天，4 个试件中 2 个产生银纹；浸泡 90 天，4 个试件中 2 个有银纹，并向厚度方向扩展。

接下来，我们会增加 40 度环境下的银纹实验。

（5）有机玻璃的透光率试验

对于有机玻璃材料的透光性，测试结果为：，4cm-8cm 厚的有机玻璃在液闪中的透光率在 96%以上；在空气中，波长 410nm 的光衰减长度为 110.1±2.0cm，波长 450nm 的光衰减长度为 278±11 cm。

（6）待进行试验

1） 不同粘接工艺下粘接强度

对于有机玻璃本体聚合，目前有几种不同的工艺，各工艺的固化时间有所不同，将进行进一步性能试验，为最终确定正确合理的工艺提供依据。

2）新粘接工艺中粘接缝与液闪和纯水的兼容性

新的粘接工艺中粘接缝的成分可能与本体会有一定的差异，因此需要测试粘接缝与液闪和纯水的兼容性。

3）有机玻璃在液闪及纯水中的拉伸蠕变性能

有机玻璃的蠕变是影响结构寿命的主要因素之一，因此我们需要测试其在液闪或者纯水中的蠕变性能，保证有机玻璃球在设计寿命内不产生蠕变破坏。

2.2 光电倍增管相关结构设计

2.2.1 PMT 电子学性能检测

江门中微子实验中心探测器采用大面积光阴极的光电倍增管读出。新型高量子效率大尺寸光电倍增管的性能是决定该探测器性能的关键器件，需要对光电倍增管的性能参数进行研究和测试。

江门中微子实验研制的大尺寸光阴极高量子效率光电倍增管样品的主要性能参数包括：

a) 单光电子响应。
b) 光阴极量子效率。
c) 增益-高压曲线和增益非线性。
d) 渡越时间分散和后脉冲比例与时间结构。
e) 暗噪声计数率。
f) 光探测效率的均匀性。

为精确测量与研究这些光电倍增管的性能，需要研究相应的测试方法，确立实验方案，建立专门的软硬件测试环境。针对大量、大尺寸光电倍增管性能测试的特殊要求，初步考虑需要搭建一个具有地磁场屏蔽能力的暗室，通过多束光纤耦合光源实现高效的测试 光电倍增管的性能测试与研究将分为样品、小批量和大批量几个阶段进行。

2.2.2 PMT 高压系统

光电倍增管的高压系统为浸泡在水（如果是备选方案，液体为烷基苯，下文忽略）中的光电倍增管提供稳定可靠的高压，包括高压电源、电缆和防水结构。这里主要考虑了几种方案：

1）一对一方案：所谓一对一就是传统的一路高压对应一个 PMT，通过分压器分压给 PMT 各极供电。其好处是每个 PMT 都可以单独调节；其不利之处在于；电缆过多，增加成本。

2）多芯电缆方案：所谓多芯电缆方案就是在外面把多路高压整合到一根多芯高压电缆中，在临近光电倍增管附近分成单路高压给 PMT 供电。该方案的优势在于可以节省大量的电缆，又可以满足每个 PMT 单独供电的需求；其不利之处在于需要再光电倍增管附近做一个密封盒来完成高压分配，需要增加电缆密封连接件，另外同一组供电的光电倍增管的增益高压设置要尽量一致。

3）前端高压模块方案：所谓前端高压模块方案就是送低压进去，在前端转换成高压来给 PMT 供电。该方案的优点在于可以大大减少电缆的使用量，节省经费；其不利之处在于高压模块出了问题无法修复。

- 前两种方案相对成熟，这里主要介绍第三种方案，即前端高压模块方案，它是基于二极管电容倍增器的高压倍增系统，这种高压系统主要用于大型物理实验中大规模 PMT 阵列的数万通道供电。以下是对此系统在基本概念上的设想：高压供电直接设于用电处；
- 固有功耗低，小于 0.05 W/道；
- 无需昂贵的高压线缆及连接器；
- 输出电压高稳定性，不多于 0.05 %；
- 针对 PMT 电流过载的保护；
- 所有通道的远程控制

由于使用 Cockroft-Walton 二极管电容倍压模式为 PMT 提供高压,使得通过扁平电缆传输低压到高压元器件,进而有可能生成 PMT 工作所需的整个高压电网。相比于基于各种分压器的 PMT 的传统高压电源,倍压模式的高压电源有若干明显优势:

1)每个 PMT 的高压线缆和高压连接器被同时连接多个 PMT 的廉价扁平电缆所取代。这是显著降低电缆设备成本，电缆数量和改善设备整体质量的方法之一。

2)电压倍增器的较高的能效会显著降低了在 PMT 电源电路中的热损失。作为一项标准，如果 PMT 没有光负载，这类元件能耗不超过 50mW。在最大光负载时不应超过 200mW。为了进行比较，在相同光负载下，分压系统通常会消耗 3-6W。实际上，所有的能耗都以热能在设备内部释放。

3)高压元件内的深度负反馈使得 PMT 上电压稳定，并提供了完善的负载特性。

4)采用倍压模式的高压电源相对于每一路 PMT 的低成本原因,不仅是没有使用昂贵的的高压线缆及连接器，而且此高压源本身的成本更低。同时其功率也比传统系统低很多。与传统类型相比，倍压型高压系统的成本在利润上是其 3-4 倍。

用于 JUNO 20"PMT 实验的高压电源集成读出系统原型设计的主要特点如表 2-4，2-5，2-6 所示：

表 2-2 USB 系统总线适配器

系统通道的最大数目	127
系统电源供电	计算机 USB 端口
基础系统总线电压/ V	LV - 5V; BV - 24
系统接口	RS-485
与计算机通讯线路	USB-2.0
工作温度范围/ º C	(- 10) - (+40)
湿度/ %	0 - 80
外形尺寸/ mm x mm x mm	70x50x22
重量/ kg	0.15

表 2-3 20" PMT 的高压元件

PMT 连接方式，接地	阴极
阳极电压调节范围/ V	1500-2500*
工作电压/ V	+2300*
阳极电压调节分度值/ V	~ 0.25
输出电压的系统误差	3%
PMT 电压稳定性/ %,	0.05%
输出电压的温度系数/ ppm/ºC	100

表 2-4 PMT 打拿极系统从阴极到阳极电压分布*：

聚焦电极/ V	+300
D1/ V	+400
D2/ V	+1200
D3/ V	+1300
D4/ V	+2100
阳极/ V	+2300
阳极电流上限/ mkA	100
从驱动到 PMT 阳极干扰（50Ω 负载，峰峰值，不超过）/ mkV	20
元件额定电压/ V	+5; +24
单元件功耗（不超过）/ VA	0.1
信道控制协议	RS- 485

*在进一步研究后进行优化与确定

2.2.3 PMT 附属结构设计

PMT 附属结构包括 PMT 防爆结构、水密封结构及其支撑结构。江门中微子实验拟采用 20 英寸光电倍增管，光电倍增管自重约 10kg，在水中承受将近 70Kg 的浮力。支撑结构用于

把 PMT 及其防爆结构和防水结构一起固定在网架上。

因为 PMT 最终工作在水中，需要对 PMT 尾部电子学及高压部分进行水密封（potting）设计，其示意图如图 2-17 所示。水密封采用有机玻璃底座结合防水胶的结构，使得 PMT 分压器及其电缆与水隔离。该防水结构的设计需要考虑其材料与水的长期兼容性，能够满足 40 米以上水压的防水要求。在完成这些设计要求并实验验证后，我们需要建立 PMT 防水结构的批量测试设备（希望此设备可以兼顾 PMT 本身的耐压测试），对每一个 PMT 安装前都需要此项进行测试。

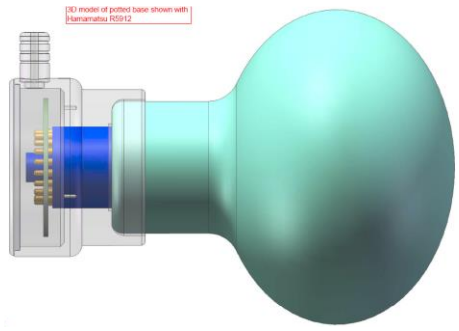


图 2-17 PMT Potting 示意图

下面重点介绍 PMT 防爆的机理研究和初步设计考虑：

PMT 波壳为脆性材料，若制作或工程安装过程中表面出现微小损伤，在外部压力的作用下则有可能产生爆炸（内爆）。根据 Super-K 实验的经验教训，某一个 PMT 发生内爆产生的冲击波将会使周围的 PMT 也发生内爆，导致链式反应，最终损坏所有的 PMT。因此需要对 PMT 爆炸产生的冲击波进行研究，并在 PMT 外部加保护措施防止冲击波的产生和破坏。

对单 PMT 进行流固耦合分析如图 2-18 所示：PMT 内外压差作用下，玻璃外罩在 5ms 左右发生破碎，并向内发生挤压，并在 40 多 ms 时达到半径最小，此时玻璃罩内空气压力逐渐增大到最大值。

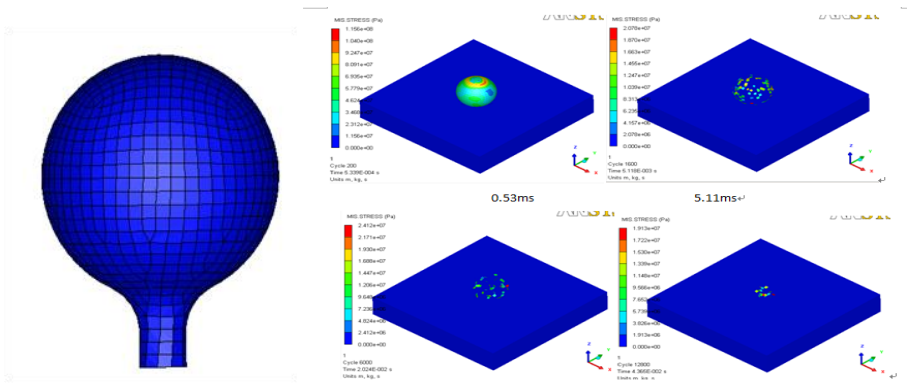


图 2-18 单 PMT 流固耦合分析

除内爆时间特性，还对冲击波强度随距离、PMT 体积以及水压展开了初步研究，如图 2-19、2-20、2-21、2-22 所示。理论计算与实验值符合较好，冲击波强度随距离呈 1/r 衰减关系，随 PMT 体积增大呈线性增加关系，随静水压力的增大而增大。

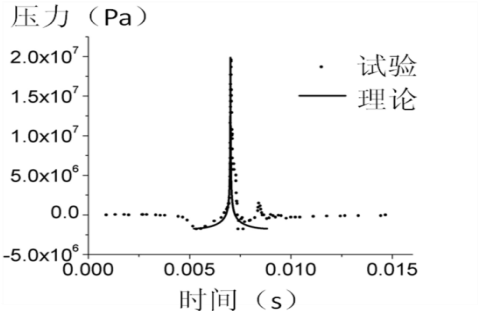


图 2-19 冲击波时间特性

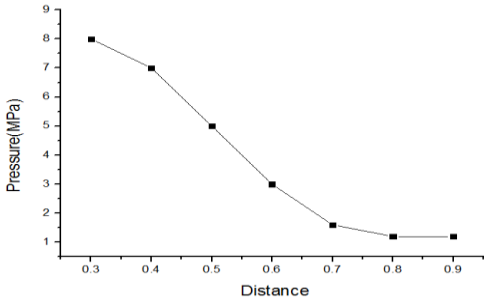


图 2-20 冲击波强度随距离关系

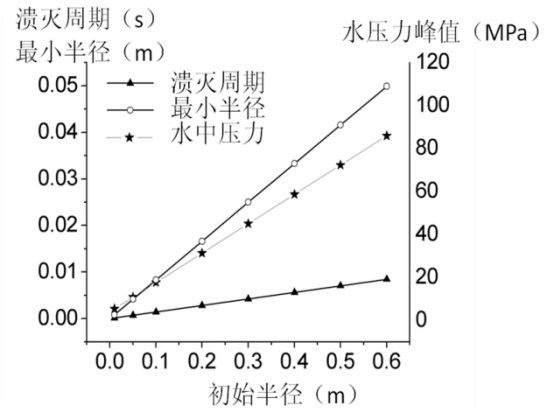


图 2-21 冲击波强度随 PMT 体积变化

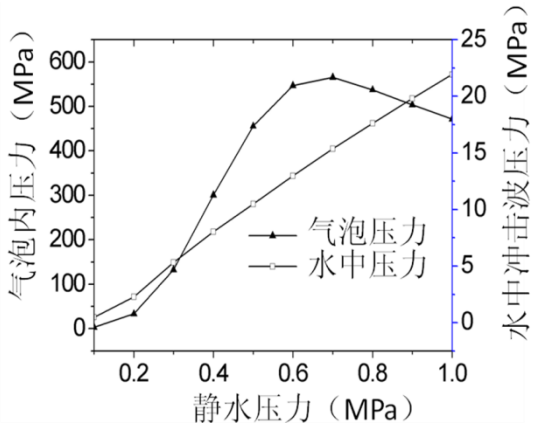


图 2-22 冲击波强度随静水压力变化

根据以上研究结果，提出了可能的防爆设计的解决思路：1）PMT 外加有机玻璃保护罩；2）PMT 后半部增加局部缓冲层；3）减小 PMT 与保护罩之间区域的水量。实验研究的下一步计划是进行单 PMT 和多 PMT 内爆及殉爆试验，验证计算分析的可靠性和防爆设计的可靠性。

2.3 研发内容及计划

2.3.1 研究内容：

1）有机玻璃球和不锈钢网架方案的整体设计、多工况的力学分析、生产过程分析、可靠性分析等。

2）有机玻璃球与网架的连接方式的研究，需要综合考虑有机玻璃内部的应力和该连接方式的生产工艺。

3）有机玻璃在液体中长期受力的性能的研究，研究有机玻璃在我们的使用工况下，其性能的变化。

4） 有机玻璃球面板制造工艺的研究，同时为控制成本要尽量减少加工量。

5） 有机玻璃本体聚合的工艺研究，在本体聚合的材料、速度、性能等方面综合研究，进行优化。

6） 有机玻璃球的节点支撑方式和数目的优化设计研究。
7） 有机玻璃球的柔性支撑方案的研究。
8） 有机玻璃接口法兰结构和密封方式的研究。
9） 不锈钢网架结构及其生产工艺的研究。
10） 有机玻璃球局部生产工艺和小模型的研究，通过制作和实验测试与理论计算分析比较。
11） 有机玻璃球清洁机器人的研制，用于有机玻璃球内表面的自动清洁。
12） 气球方案的一些关键问题的研究，比如气球材料的性能和选择，气球的生产工艺，气球的检漏和防尘方法，气球方案的长期可靠性等。
13） 光电倍增管的防爆研究，进行方案设计、实验验证和再优化设计。
14） 高覆盖率光电倍增管安装排布方案的研究。
15） 光电倍增管附属电路的防水设计研究。
16） 光电倍增管水下高压系统的研究，在水下实现低压到高压的转换。
17） 大量大尺寸光电倍增管的多性能的快速测试研究。
18） 中心探测器及反符合探测器的液体自动灌装系统的设计研制。
19） 2 万吨液闪在探测器长期运行期间的自动循环系统的研制。
20） 探测器长期运行期间，多种方式监测运行状态的研究。

2.3.2 研究计划

- 2013 年

1） 进行中心探测器的概念设计，对多种候选方案进行设计、计算和实验。
2）对中心探测器研制进度、经费、人力等进行整体规划。

- 2014 年

1） 对多种方案进行评审，挑选一个主要方案和一个备选方案，之后对这两个方案进行深入研究，通过计算和模型实验解决关键问题，最终选定探测器结构方案。
2）进行光电倍增管防爆的初步设计和实验。
3）开始进行大尺寸光电倍增管样管的性能测试研究。

- 2015 年

1）推进探测器的优化设计，进行小模型的设计、制造和实验，研究探测器的现场生产工艺。
2） 研究光电倍增管附属电路的防水设计。
3） 基本确定光电倍增管防爆破的设计方案。
4）研究光电倍增管的小批量测试方案，包括电子学性能测试、防水耐压测试方案。

- 2016 年

1) 继续进行探测器主结构设计和现场制造工艺的优化研究。
2) 确定光电倍增管的大批量测试方案，包括电子学性能测试、防水耐压测试方案。
3) 开始进行液体灌装系统的设计。开始进行探测器监测系统的设计。
4) 确定光电倍增管的高压系统方案。
5) 开始光电倍增管的防爆结构的生产。
6) 完成探测器主结构的工程设计。

- 2017 年

1）招标确定探测器主要结构的生产厂家，并开始部件的生产。

2） 确定光电倍增管的高压系统方案和防水设计。

3） 开始光电倍增管的批量检测。

4） 确定液体灌装系统的方案设计，招标确定生产厂家。

5）进行液闪氮气保护系统的设计。

- 2018 年

1）开始探测器的现场安装。

2） 继续进行光电倍增管的批量检测。

3）进行探测器附属的监测设备的安装。

- 2019 年

1）完成探测器主结构现场安装。

2） 完成光电倍增管现场安装。

3） 完成探测器监测系统现场安装。

4）完成液体灌装系统现场安装，开始液体灌装。

- 2020 年

1）完成探测器液体灌装。

2）完成探测器的调试，探测器开始运行取数。

2.4 探测器制作

2.4.1 网架制作

网架结构在现场施工快速便捷，采用螺栓球节点的形式也可以避免大量的现场焊接工作量，不产生焊接变形和焊接应力。整个网架的设计、制作过程要按照现行的相关国家设计标准、规范及规程进行。目前，在我国，网架结构已大量应用于各类建筑中，许多专业公司对于球形网架的设计、制作也具有雄厚的技术力量和丰富的实践经验。

网架制作分为两个阶段，一个阶段是工厂前期材料加工制作，另外一个阶段是现场拼装施工。所有的螺栓连接件、杆件、螺栓球均需要在工厂完成加工、成型，在这个阶段要确保各零部件的加工精度和质量。到达实验厅现场开始网架施工前要确保各作业条件达到要求：对网架的制作区域地基进行检查；对进场材料和零部件的材质、规格进行复查；对土建预埋件标高、轴线、水平倾斜度进行认真复核；对网架支座、轴线圆度、等分角度应严格控制和检测，因为网架的前三圈的安装精度和圆度决定以后向上安装的难易程度，所以其轴线必须加以精确定位，制作的标高必须事先复测，超差的必须采取措施找平修正。为控制和校核网架节点的坐标位置，每个区域设置一定数量的控制点。待土建、工作平台、安全措施、提升条件都到位后，各项参数都满足设计及规范要求后，即可按照制定好的详细的施工方案顺序进行网架安装。结合我们的现场条件，可以采用局部满堂脚手架、结合高空散装法进行网架晚装。一般情况下，首先要将网架下部支座按照图纸就位，连接水平杆，形成圆无误后，进行初步固定，然后开始第一圈安装，之后固定所有的支座，再用两台吊车对边顺次安装。整个网架安装过程中要借助经纬仪等测量仪器控制各部分的制作误差，网架整体成形后检查螺栓拧紧程度，对松动的部分进行复拧。

对于中心探测器，网架和有机玻璃球并非相互独立的两个部分，因此在施工时要考虑各自的施工顺序和施工工艺，网架制作需要和有机玻璃球的施工需求统一考虑，二者可以同步、逐层进行施工，也可以在网架建造基本完成后再进行有机玻璃球的制作，具体工艺细节后期会逐

步完善。总体来说，网架制作过程中要保证有机玻璃球的安全，施工过程中脚手架搭设要求牢固、安全、适用，另外网架施工过程中的工作载荷不能使网架发生变形。

2.4.2 有机玻璃球建造

有机玻璃球由多块有机玻璃板拼装、粘接而成，其示意图如图 3 所示，按照目前的方案，有机玻璃球体由 170 多块有机玻璃板经本体聚合粘接而成；球体顶部设置有开孔，作为液闪灌装通道以及刻度装置接口； 球体下端预留法兰孔，建造过程以及建造完成后可以作为球体清洗的排水孔，工作时用于液闪循环。

在厂家具有生产能力、满足运输条件的前提下，有机玻璃分块尽量大，以减少粘缝长度和现场拼装难度。 初步考虑球体分为 17 层，于赤道上下对称，共 174 块有机玻璃，有机玻璃分块最大尺寸不超过 3m ×8m，整个有机玻璃球本体聚合缝总长度约 1.8km 。

有机玻璃球的建造分为工厂实施期和现场施工期：

在工厂实施期内，要完成组成球体的所有曲面板的制板、烘弯成型、打磨抛光、消除应力等工作，并在工厂进行放样检查，确保各板面的尺寸及精度满足要求。在工厂实施期内，还要完成用于安装定位的夹模具，包括调整弧度和间隙需要用的其它工装设备。工厂实施期后，所有板材及工装设备运到现场进行现场安装。

有机玻璃球的现场施工要和网架安装顺序相结合，外部网架建造完成 75%左右时，有机玻璃板材开始进场准备安装，这样有机玻璃的安装可以借用网架作为相应的工作和支撑平台。有机玻璃球的现场安装是由球底部开始，从下安装开始逐步向上推进；；每块板材吊入球的安装点，再将亚克力上的埋人式不锈钢支点连接件与网架结合；当每一层结合完、调整好圆准线后，用模具卡死，再做第二层。当吊装完几层时，再次调整弧面与弧线，确定在允许误差范围内时，由上到下逐条、逐层进行本体聚合；依次类推，直到全部拼接完以及打磨抛光以后，进行退火去除应力工作。

中心探测器在现场制作时，安装大厅需要有人、货两个运输设备。即工作人员的电梯和亚克力吊车。球体内需要一个共 3 米高、双层的工作平台，主要用于调整亚克力球体的准确度和拼接、打磨等工作，它是固定在塔吊上面的可以上下调节的活动（包括直径方向）平台。球体外部采取全部工作区域内满球体搭建脚手架，这样可以有利避开亚克力球的钢网架结构，此脚手架不但用于亚克力球的安装，今后还可以利用方便探测头的安装。不管球内和球外，为员工的安全和亚克力球的安全，均需要设置双层安全网兜（这样不需要使用安全气囊）。另外，必要的消防和换气设备是非常重要的，特别是在球体拼接时期会有部分气体挥发，而且是易燃的。

2.4.3 光电倍增管安装

有机玻璃球和不锈钢网架制作完成后，需要将约 15000 个 PMT（光电倍增管）安装到网架内侧，这些 PMT 要求尽可能紧密排列，以达到 75%以上的光学覆盖率。为尽可能缩短现场安装周期，PMT 的安装考虑采取模块化安装，将若干数量的 PMT 在地面实验装配大厅里安装成一个模块单元，然后运到地下实验厅，进行模块单元的安装。目前考虑有两种安装及固定方案。

一种方案是用不锈钢板作为 PMT 模块单元的基板，每个单元中的 PMT 均有自己的防爆破结构和固定夹具，所有 PMT 均固定于不锈钢基板上，如图 2-23 所示。不锈钢基板背面设计有滑轮，可以实现在轨道上的滑动。不锈钢网架制作中可以预留径向缺口方便模块单元的吊装，内层网架上沿纬向设置有环形导轨，模块单元吊装入网架内部后，通过不锈钢背板上

的滑轮在环形导轨上的移动实现模块的就位及固定，此安装方式示意图如图 2-24 所示。模块单元大小及不锈钢背板形状的设计和选择要结合有机玻璃和网架之间节点及支撑杆的位置和数量来考虑，尽可能利用现有空间达到最理想的覆盖率。

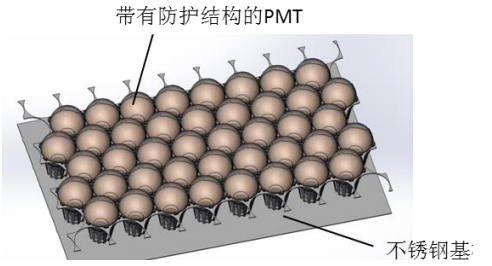


图 2-23 PMT 安装不锈钢基板

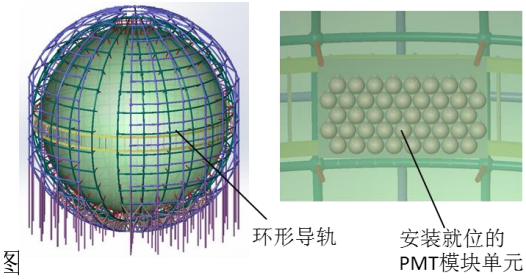


图 2-24 基板式 PMT 安装示意图

另外一种方案是采用型钢做为 PMT 模块单元的支撑结构。首先在内层网架上按照 PMT 的排布位置安装对应的型钢支撑件，型钢和网架之间通过快速连接件进行连接。然后 PMT 用专用夹具固定于型钢上，该方案的安装思路见图 2-25 示意图。该方案可以实现多个工作面同时作业，一定程度上也可以缩短安装时间。

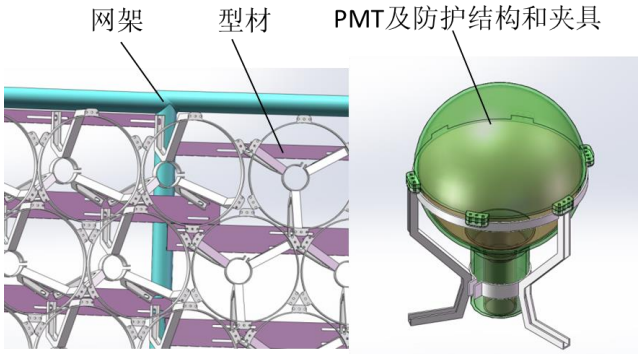


图 2-25 型钢式 PMT 安装示意图

2.5 方案风险评估、可靠性分析

（1）结构可靠性

中心探测器的有机玻璃球+网架方案可以参考建筑领域的大型球形玻璃建筑结构和玻璃幕墙技术，在建筑领域已经有多个类似大型球形结构建成并长期使用。我们的情况是把玻璃换成有机玻璃，而且有机玻璃球要求本体聚合、内外灌装不同液体、长期受到压力和浮力。该方案中，钢结构本身的可靠性不是主要问题，主要考虑有机玻璃结构的可靠性，包括：

1） 有机玻璃本身在受力情况下浸润有机和无机液体的老化性能目前我们尚未完全清楚，需要理论分析与实验验证相结合，确认能工作 20 年可靠无误。

2） 有机玻璃为脆性材料，如果产生裂纹则该裂纹会发展以致有机玻璃球体局部破裂。该破裂在有机玻璃制作过程中发生可以修补，但是，如果在灌完液体后产生，会造成液闪和水的混合，导致实验失败。

3） 有机玻璃与钢结构的连接处局部应力较大，需要合理设计并控制应力水平。

4） 按照 SNO 和大亚湾实验的经验，有机玻璃应力控制在 5MPa 左右，有一定的难度，需要进一步的工作

（2）工艺实施的可靠性

厚有机玻璃板的球面成型工艺和大型有机玻璃球的现场制作工艺还有不确定性，需要摸索研究。

（3）计算分析的可靠性

计算的准确性和实际的情况需要比对，通过节点实验和小模型实验验证计算是否正确，考虑计算最大偏差后应当实现风险可控。

（4）施工风险

网架具有成熟的规范，施工风险不大。有机玻璃球本体聚合中采用相当多的手工性质的操作，存在操作人员的操作差异，要求操作过程尽量标准化，引入客观的无偏的质量控制，如有机玻璃应力、变形的监控等。如果有机玻璃局部具有缺陷，则需进行修补。有机玻璃局部破裂可修复。

（5）局部失效

局部失效是指有机玻璃球与钢网架的连接固定发生局部的失效，需要分析整个结构的变化。目前的计算显示如果失效发生在不锈钢结构上，则对结构的影响不大；如果失效发生在有机玻璃上，则会导致裂纹产生严重的影响，需要设计弹性连接避免该类失效的发生。

（6）液体长期兼容性和泄露

有机玻璃和液闪及水的长期兼容性已经被实验所证明，本体聚合工艺原则上不会产生泄露问题。

（7）长期性能

一般来说有机玻璃本身的寿命能够达到 30 年以上，加拿大 SNO 实验[1]有机玻璃球自 1996 建成至今已运行将近 20 年。针对我们的使用情况，需要对有机玻璃的老化进行专门研究。

2.6 方案进度及经费预算考

2.6.1 进度预算

总体需要约 18 个月，具体时间表如下：

（1）网架制作： 3 个月（2018.1－2018.4）

包含接口（地面支腿、墙面阻尼连接）、工装安装、网架吊装、位置测量、螺杆固定、survey 等。

（2）有机玻璃球体制作：8 个月（2018.5－2018.11）

考虑有机玻璃吊装，工装安装，位置测量，不锈钢节点连接与调整，本体聚合，应力监测，液体灌装与循环接口的安装，刻度装置接口等，初步估计为 8 个月左右时间。

（3）有机玻璃球 survey 和接口检漏：1 个月（2018.12）

（4）有机玻璃球内外清洗：，0.5 个月（2019.1）

有机玻璃球内外表面积约 8 千平方米，内表面接触液闪，有很高的洁净度要求。但是很难人力直接清洁，所以内表面清洁需要研制专用清洁机器人。清洁时需要在有机玻璃球底部留排水孔，

清洁后进行封堵。机玻璃球外表面也需要清洁。

（5) PMT 和 Sensors 安装及测试：5.5 个月（2019.2－2019.6）

这里按照 8 个工作组同时安装考虑，每个工作组每小时安装 2 个，每天工作 8 小时，1 天可以安装 4x4x8=128 个，15000 个 PMT 共需要 117 个工作日，按照一周工作 5 天算，大约是 5 个半月。

另外每个 PMT 安装后需要将各电缆引出并进行测试，电缆排布、测试和安装需要不同的工作组，可以穿插进行，以节省时间。

（6) 安装后中心探测器清洁（VETO 安装后统一进行）：不占用中心探测器建造时间，包括 PMT 表面、电缆、网架、有机玻璃球外表面等。

（7) 液闪灌装：不占用中心探测器建造时间。

2.6.2 经费预算

总体经费需要 1.575 亿元，具体如下：

（1）网架制作： 2500 万元。

网架重量约 630 吨，价格约～4 万/吨 ；

（2）有机玻璃球制作：6900 万元。

主要考虑有机玻璃球重量约 600 吨，材料、加工费约 10 万元/吨，共计 6000 万元。另外有机玻璃块见的本体聚合粘接缝总长长约 1800m，深缝的本体聚合单价约为 0.5 万元/m；共计 900 万元。

（3）PMT 附属结构及测试： 4950 万元。

PMT 的含有机玻璃保护罩约需 0.12 万元/只，不休钢支架等）约 0.06 万元/只；

PMT 防水结构约 0.05 万元/只；15000 只共计约 3450 万元。

PMT 批量测试包括设备和部分人工约需 0.1 万元/只；15000 只共计 1500 万。

关于光电倍增管的防磁结构，目前有两种考虑：一种是整个水池建造反向螺线管屏蔽地磁而且其效果很好，那么就不用单独设计其防磁结构；另外一种是需要设计防磁结构，初步考虑使用防磁膜材料，价格约 0.04 万元/只，总价约 600 万元。

（4）屏蔽液体（纯水）：600 万。

屏蔽液体为纯水，需要和反符合探测器共用其纯水装置，但考虑水量增加约 6000 吨，纯水装置需要增建，单价约为 0.1 万/吨，共计 600 万。

（5）液体灌装系统约需 800 万元。

2.7 不锈钢球罐 + 气球备选方案介绍

2.7.1 备选方案简介

江门中微子实验中心探测器的备选方案为不锈钢球罐+气球方案。该方案中不锈钢球罐直径约为 38 米，位于实验厅水池中央；气球直径为 35 米，位于不锈钢球罐内部。气球由透明薄膜焊接而成，气球内部灌装约 2 万吨液体闪烁体作为靶物质，在不锈钢球罐与气球之间灌装烷基苯或者白油作为阻挡液体。气球的作用是分隔液闪和阻挡液体，气球内外液体的密

度差约 0.3-0.5%。为了使气球受到的应力最小、并且保持较为理想的形状，气球需要有可靠的支撑约束结构。目前拟采用有机玻璃板作为气球的支撑结构，有机玻璃板采用点式幕墙结构，在不锈钢球罐内形成一个直径约 35 米的有机玻璃球面支撑气球。探测器中约 15000 个 PMT 安装于不锈钢球罐内壁。该方案示意图如图 2-26 所示。

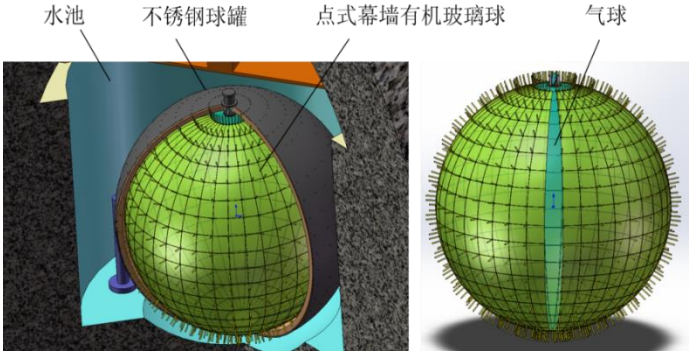


图 2-26 不锈钢+气球方案示意图

2.7.2 气球结构研究

方案中气球膜拟采用 ETFE 膜材料或者 PE/PA 或 PET 膜，气球上下两端头设计有不锈钢法兰盘。下法兰盘与灌液管连接，上下灌液管穿过并固定在外面的不锈钢球罐上，实现液体的灌装、循环。本方案中，由于气球是整个支撑于有机玻璃球形结构内，所以气球膜的受力可以不作考虑，有机玻璃球支撑结构也能够将气球形状控制到较为理想的水平。因此对于气球的研究工作主要集中在以下几个问题：气球所用材料与实验用液体的兼容性、气球材料的固有放射性、气球材料的透光性能、气球制作和安装过程的洁净度、气球结构的密封性以及整个结构和材料的长期可靠性。

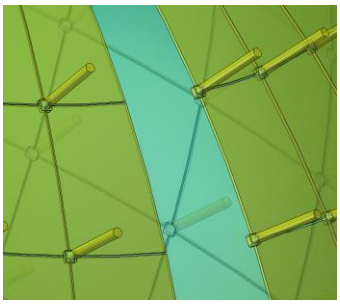
据目前的研究结果，ETFE 膜材料屈服强度约 18Mpa，具有良好的兼容性、耐久性、强度、抗冲击、自洁性，但是其透光性能略差，50um ETFE 膜的透光率只有 93%。PE/PA 膜和白油兼容，与液闪的兼容性仍在测试中。PET 膜兼容性和透光性都没有问题，问题是其柔韧性略差。在国内已经调研了多家膜的生产公司，这些公司都是专业生产销售高品质集装箱液袋公司，所有材料和工序都经过严格的内部和全球性认证机构的严格检验，之后将会与他们做进一步合作，共同完成本方案中气球的研制。

为保持气球表面清洁，减少灰尘本底水平，气球制造和安装需要在洁净环境下进行，初步估计制作车间洁净度 100-1000 级之间，并保持恒温恒湿环境，生产过程中通洁净空气除氡。在工厂生产车间完成气球制作后要将其按照在现场安装时容易打开的方式折叠成长形袋子，外面再套多层洁净的保护膜，比如 PE 膜，保湿密封后进行运输。对于 ETFE 材料，自洁性较好，较方便实现冲洗。

制作好的气球在工厂和在现场安装时都要进行检漏，按照液闪中 PPO 在 10 年内进入阻挡液体的浓度<10ppm 来估计，气球要求低漏率，漏率要求为 ~5×10^{-2} cc/s (在 3mbar 液体压力下)。在工厂的检漏可参考 Borexino 实验采用的方法[2]或者采用真空检漏法进行，球部分折叠摊开在平面上，上面覆盖其它膜并加负重以限制球整体体积。充气到一定压力使气体进入到球的每个角落。利用已知固定体积的容器作为连通器，换算出此时球的体积，测量 SF6 浓度随时间变化计算漏率。在现场安装后的检漏可以充气后检测求内目标气体浓度衰减率来确定漏率或者检测钢球内气球外目标气体浓度增长率来确定漏率。更为详细的检漏方法和技术有待进一步研究和实验。

2.7.3 有机玻璃支撑结构

在本方案中，有机玻璃支撑结构直径约 35 米，通过支腿将各有机玻璃板固定在直径约为 38 米的不锈钢球罐内壁上，如图 2-27 所示。因为这些有机玻璃板的主要功能是支撑气球，因此不需要对有机玻璃板间进行密封，从而也降低了在现场安装的难度和周期。有机玻璃板的厚度为 10~30mm，这个厚度的有机玻璃板可一次成形，无需多层板本体聚合。



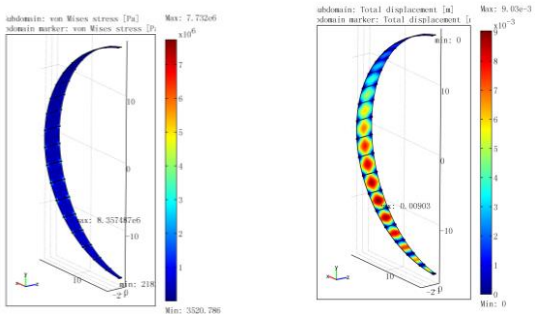


图 2-27 有机玻璃球做为气球支撑结构　　**图 2-28** 有机玻璃球主体应力和位移

本方案中，有机玻璃支撑板所支撑的气球内液体为液闪，有机玻璃支撑板外液体为白油或者烷基苯，内外液体密度会有小的差别，预期该密度差为 0.3-0.5%，在受力分析中我们取 0.5%做为计算条件，球体内壁受静水压力，整个球受自身重力和液闪浮力作用。初步分析中取 1/40 经线球，在有机玻璃支撑腿处做固定约束，采用四面体单元进行有限元分析。有机玻璃厚度初步取为 25mm，图 2-28 为其分析结果，主体应力小于 2MPa，整体位移约 9mm。支撑点局部应力受网格影响比较大，需要后期结合具体的支撑结构做进一步细化分析。

2.7.4 不锈钢球罐

该方案中不锈钢球罐为中心探测器的外层结构，不仅要承载液体，而且还要作为内层有机玻璃球和气球的支撑结构，同时也要考虑约 15000 个 PMT 在不锈钢球罐内壁的安装结构。该球罐有别于相关标准中常规的压力容器球罐载荷的分析，设计要紧密结合安装条件和实施过程来完成，需兼顾经济性和可靠性。按照本方案的工况以及实验要求，目前球罐的初步结构方案示意如图 4 所示。

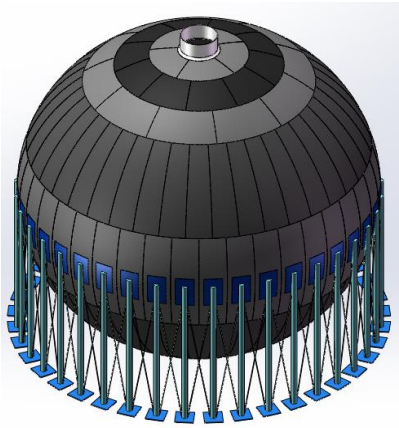


图 2-29 不锈钢球罐结构方案示意图

球罐选用支腿式结构，由焊接于赤道处的立柱支撑于实验厅水池中央，球罐顶部设计有开孔，开口设计要考虑以下几方面的需求：刻度装置的安装接口需求；吊装的 PMT 单元的尺寸需求；球罐的通风和照明；PMT 收口单元的安装，;电缆的引出等。开口部分要高出水池封盖，在水池封盖上面颈部处开电缆出口，因为开口部分上部不与水接触，较容易实现密封。球罐下部要设开孔，用于清洗阶段排除污水；也可以用于安装期间进人的人孔。

整个球罐采用分片焊接的方式制作，初步考虑球面分为 9 带、由约 170 片球瓣组成，球瓣部件在工厂加工成型，运到现场进行拼装、组焊。根据目前在国内的调研结果，国内很多专业球罐及压力容器公司都有过大型球罐的制作经验，国内最大的球罐直径达到 50 米直径。但是对于不锈钢球罐，国内最大只做过 17 米。对于我们方案中涉及到的 38 米直径的不锈钢球罐，虽然有一定的难度和挑战，但是这种制造是有国家规范和标准可循，有很多可参考和可借鉴的制作经验。

2.7.5 安装考虑

对于该方案，当不锈钢球罐在实验厅制作完成后，要进行 PMT 的安装和有机玻璃支撑板的安装。约 15000 个 PMT 大多以单元的形式在不锈钢球罐里进行安装，一个 PMT 单元由若干个 PMT 在地面装配大厅预组装而成，这样可以减少实验厅现场安装的工作量。局部有些地方需要设置单个 PMT，如果电子学前放在前端，这些单独的 PMT 的位置可以用来安装电子学盒。PMT 单元的底板采用不锈钢制作，上面用于固定 PMT，钢板上面有筋板用于加强其刚性，因每个 PMT 有大约 60 公斤的浮力，钢板一定要有比较好的刚性，这个可以通过加强筋板解决，钢板和刚罐壁之间需要留约 10 厘米的间隙，这个间隙用于走电缆。

制作过程中，会在球罐内壁安装脚手架。当球罐完成之后，利用这些脚手架从上往下清洗球罐，如果电缆和 PMT 单元可以分开安装的话，这时可以在球罐内壁铺设电缆，在球罐内壁上面预挂吊绳，为 PMT 单元的安装做准备。球罐清洗、电缆铺设完成后，拆掉脚手架，如果电缆和单元连在一起安装，这是脚手架最好不要拆掉，便于安装时铺设电缆使用。在不锈钢球罐外面安装罐装液闪和 LAB 的管道，其进入钢罐的入口放在钢罐的最下面。从下往上安装 PMT 单元。利用罐内壁上面预挂的吊绳，采用手动倒链把 PMT 单元安装到球罐内壁上。每安装完一个单元，就可以连接上 PMT 电缆，安装完一圈探测器单元，对单元中的 PMT 进行简单测试。

PMT 单元固定到球罐内壁后，在 PMT 单元背板上安装有机玻璃杆，在杆上固定有机玻

璃板，用来支撑液袋。单元 PMT 经过测试没有问题后，就可以灌水，当水位达到这一圈单元顶部时，就可以进行下一圈 PMT 单元的安装了。所有 PMT 单元和有机玻璃板都安装完成后，把水从球罐底部预留的连通孔中排出，排水过程中要保证从球罐顶部进入的空气是完全清洁的。当水全部排出球罐之后，可以从上面吊装气球，下面人可以从球罐下面的人孔中操作液袋下法兰，连接液闪罐装管道。液袋吊装完成，上下法兰固定好之后，封闭球罐上口和下面人孔的法兰，防止灰尘进入球罐，污染球罐内环境。封闭液袋上法兰，通过液闪罐装管道往液袋内充检漏气体，在充气的过程中，从 LAB 罐装口排除球罐内的空气。检测球罐内排出的空气成分就知道液袋是否漏气。检漏完成后，用法兰封闭下面人空，并对该法兰检漏，没有问题后就可以罐装液闪了。液闪罐装过程中，一定要注意液闪、LAB 和球罐外纯水的罐装速度。

2.7.6 小结

该方案的优点在于气球可以提前在工厂制造好运到现场，在现场只进行安装和最终检漏工作，因此占用现场工作时间较少；气球制作本身造价低，可以制作多个气球运到现场作备份，如果某个气球在安装过程中发现检漏不合格或因其他原因被损坏，可以在短时间内换装另一个。气球结构的另外一大特点是属于软体结构，在大的震动冲击中（如地震）不容易破裂。另外，由于本方案中采用有机玻璃结构做为气球的支撑，大大降低了气球的受力水平，提高了气球的安全度。由于有机玻璃做为支撑不需要密封，所以在制作和安装上都减少了工作量和工作难度。但是由于该方案中涉及到不锈钢球罐的现场焊接、制作以及在不锈钢球罐内部大量的安装工作，包括有机玻璃球体的拼装、PMT 的安装以及气球安装等，操作相对复杂一些，因此目前阶段只作为备选方案。

参考文献：

[1] J. Boger et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 449 (2000) 172－207

[2] J. Benziger et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 582 (2007) 509–534

第3章 江门中微子实验液体闪烁体

3.1 液体闪烁体研制概述

液体闪烁体是探测器的靶物质， 实验利用电子反中微子在大型液体闪烁体探测器中的反β衰变反应来测量反应堆中微子，从反应堆产生出来的中微子与中心探测器中的液体闪烁发生作用，产生光生电倍增管可以探测的光信号，根据探测器总体设计要求，液闪研制课题拟开展 2 万吨高性能液闪的研究，拟在提高光输出，增加衰减长度和降低放射性本底三个方面开展关键技术的研究。具体研究采取实验室研制，与原材料厂家配合，小规模生产到大规模生产的步骤，在实验室基本确定纯化方案后，用大亚湾一个中心探测器（AD 探测器）检验实验室方案，对 AD 探测器中约 20 吨的液闪进行纯化，检验液闪的纯化效果，并根据 AD 探测器数据分析结果对液闪的比例如 Bis-MSB 对光产额的影响开展进一步的研究，最终确定江门中微子实验液闪的配方和纯化方法。

液闪研制将根据实验需求建立多套液闪性能测量设备，针对 LAB 的杂质组分结构，基本的物理、化学性质，生产厂家的现行生产工艺流程、生产过程中的质量控制等方面，通过有效的物理、化学分析测量手段和高精度的检测方法，深入探讨影响线性烷基苯（LAB）光衰减长度和发光机制的内在原因和关键问题。利用多种测量方法如：LAB 光衰减长度测量、液闪光产额、发光时间特性、发光物质 PPO 各种特性测量，气相色谱-质谱联用仪（GC-MS）、液相色谱-质谱联用仪（LC-MS）、紫外可见分光光度计（UV-VIS）、电感耦合等离子光谱发生仪（ICP）和大量的样品制备、测试和分析开展研究。在对烷基苯中杂质成分的研究中，针对各种不同的杂质开展多种纯化方法的研究，在实验室研究工作基本成熟后，经过中型探测器的实际检验，将确定的测量和纯化方法推广到整个 2 万吨液闪制备的过程中。同时由于大量的烷基苯，液闪在生产、运输、纯化、混制过程中需有存储设备的建立，清洁，安全等诸多要求，所以批量生产液闪时这些工作也需要仔细安排和考虑。

3.2 液体闪烁体的总体设计

根据现有探测器方案，液体闪烁体的设计目标和规格如下：

1，液体闪烁体总质量：2 万吨。

2，液闪配方：参考大亚湾实验液闪配方，即：含有 3g/L 2,5-二苯基噁唑（PPO），15mg/L 对-双-(σ －甲基苯乙烯基)苯（bis-MSB）的线性烷基苯（LAB）溶液，最终配方将根据今后的实验结果确定。

3，液体闪烁体的相对光产额不低于大亚湾液闪水平，相当于蒽晶体的 45%。

4，衰减长度大于 22 米，吸收光谱尽量低，430-600nm 波段吸收低于 0.003

5，低放射性本底，在反应堆物理期间 U, Th, and K^{40} 的放射性要降低到 10^{-15} g/g

3.3 液体闪烁体性能测量

液闪研制过程中需要建立一个质量控制系统来监测 LAB 和液闪的各种性能，主要测量液闪的发光衰减长度、光产额、吸收光谱，长期稳定性、温度响应和电子能量非线性，液闪的瑞利散射等一系列性能，同时为了配合纯化方案的研究还要做烷基苯的杂质分析和放射性

含量测量。

3.3.1 吸收光谱的测量

吸收光谱测量是一定波长下一定厚度的液体对光的吸收。该测量一般使用紫外-可见分光光度计（波长范围通常为 190~900nm）进行，仪器操作相对简单，测量快速准确，需要的样品量少，适合实时监测，对于透明度差的液闪，吸收光谱的测量达到到快速检测的目。但是由于江门中微子实验使用的液闪透明度非常高，紫外-可见分光光度计由于商品设计的局限，接近仪器的检测限，无法进行准确测量,在液闪的研究阶段，需要配合更多的测量手段。

3.3.2 液闪光产额测量

在液闪的整个研究过程中，液闪相对光产额的检测是一个非常重要的指标，为了测量液闪的光产额，实验将搭建一个加装符合探测器的光产额测量装置，测量结果为一个高斯谱型，从而能减小拟合误差，得到更好的拟合结果，更好的测量精度。JUNO 实验需要较高的光探测效率，光产额达到 1100 光电子（pe）/MeV，能量分辨达到 3%/E，液闪的光产额越高越好。在低温下液闪的光产额会有较大的提高，为了了解在液闪低温下的光产额的变化情况，我们将开展液闪温度响应实验，精确测量光产额随温度的变化，为探测器整体设计提供实验数据。

3.3.3 衰减长度的测量

中微子被俘获后产生的闪烁光需要经过液闪后由外层的光电倍增管收集，因此如何尽量地减少闪烁光经过液闪后的损失，是提高中微子实验能量分辨的重要研究课题之一，由于探测器直径为 34 米左右，为了测量到探测器中心部位产生的信号，液闪的衰减长度需要达到 22 米以上，液闪的高透明度是 JUNO 实验成功的保障之一，所以测量装置需要达到 22 米以上衰减长度测量能力，这个装置就可以用于表征在研究过程中的液闪纯化的光学效果，测量结果可与吸收光谱测量结果相互校正

3.3.4 基苯的杂质分析

GC-MS 即气相色谱-质谱联用法，常用与有机混合样品的分析，兼具有气相色谱的高分辨率和质谱的高灵敏度。通过使用气质联用对烷基苯进行分离检测，可以得到主要组分的种类和相对含量，同时也得到主要杂质的种类和含量，为下一步实验和纯化方案的确立提供依据

3.3.5 液闪放射性含量测量

测定中微子质量顺序是江门中微子最主要的科学目标，同时还必须兼顾其它科学目标，由于中微子事例稀少，要在大量的宇宙线，岩石放射性和探测器中各种物质带有放射性本底

中分辨出好的事例，所以降低放射性含量是液闪研究的主要任务之一，根据实验要求，液闪的放射性本底在反应堆物理时应该控制在 10^{-15}g/g 的量级，在更进一步的物理研究中应该达到 10^{-17}g/g 的量级.

3.3.6 液闪电子能量非线性测量

液闪对电子能量响应是非线性，也就是不同的入射能量的电子在液闪中产生的光子数不是一个线性正比关系，这个性能如果不研究清楚，会影响整个 JUNO 探测器的能量分辨，所以这是一个液闪研究的重要内容，我们将搭建一个测量装置，把液闪的电子能量非线性曲线在 1MeV 一下的误差小于 1%。

3.3.7 液闪的瑞利散射

闪烁光在吸收过程中能量转化为热能，被吸收的光子不能被 PMT 探测；闪烁光在散射过程中方向被改变，被散射的光子不会消失还能被 PMT 探测。液闪高透明度要求对于闪烁光液闪的吸收长度长，因此液闪的吸收长度是一个需要测量的物理量，然而，液体的吸收长度不容易直接测量。一般而言，采用测量液体的衰减长度和散射长度，通过公式 $\frac{1}{L_{att}}=\frac{1}{L_{abs}}+\frac{1}{L_{sca}}$ 计算液闪的吸收长度。其中 L_{abs} 是吸收长度， L_{sca} 是散射长度。

另一方面，尽管散射过程不会减少光子数，但是它会改变光子的传播方向，降低中心探测器的位置分辨能力。

液体的散射过程一般包括 Rayleih 散射，Mie 散射和吸收重发射三种过过程，它们满足下列关系

$$\frac{1}{L_{sca}}=\frac{1}{L_{Ray}}+\frac{1}{L_{Mie}}+\frac{1}{L_{are}}$$

由于 JUNO 的液闪会将被纯化成为无尘液体，Mie 散射可以不考虑。根据已有的实验结果，LAB 在波长大于 370nm 时，吸收重发射现象很弱。因为 JUNO 液闪的闪烁光波长在 430nm 附近，因此闪烁光的吸收重发射相比也可以忽略不计。总之，Rayleigh 散射是闪烁光的主要散射过程，需要对它做定量研究。

3.3.8 利用大型探测器研究液闪配方和纯化方法

探测器总光产额的提高对江门实验的设计非常重要,通过液闪配方的优化研究可以提高光输出，改善能量分辨。对液闪纯化装置的研究要遵循先搭建实验室小型的纯化设备，研究各种纯化方法的效果，以及最佳的工艺参数。在此基础上再制造中试纯化装置，利用大亚湾实验的一个 AD 探测器，开展大型液体闪烁体探测器的技术研究，根据实验室研究成果建立液闪循环纯化系统。对比纯化前后液闪性能，包括光学性能和放射性本底等，评价循环纯化系统的效率，确定最终江门中微子实验液闪的配方，确定最终烷基苯和液闪的纯化方案，为江门实验建立批量生产的纯化装置。

3.3.9 超纯氮气的测量

超纯氮气的使用主要是减小液闪中的放射性本底，由于空气中有一定量的放射性物质如 Rn-220、Xe、Ar 这些气体都有放射性，所以在对液闪容器以及给液闪本身进行氮气清洗时必须需要高纯度的氮气，才能达到项目对放射性的要求。高纯氮气是通过 99.999％的氮气经过液氩冷井后，达到放射性含量小于 10^{-17} 的高纯氮气。对高纯氮气的测量将采用 Agilent 7890A/5975C 气质联用仪测量，气质联用仪是将气相色谱仪和质谱仪联合起来使用的仪器。质谱法可以进行有效的定性分析，而色谱法对有机化合物是一种有效的分离分析方法，这两者的有效结合给我们提供一个进行复杂有机化合物高效的定性、定量分析工具。这个设备已经可以运作，目前能测量到氮气中的氩含量。

3.4 开展的研究工作

3.4.1 液闪原材料的研究

3.4.1.1 烷基苯纯化研究

线性烷基苯即 Linear Alkyl Benzene（简称 LAB），一般由苯环上连有 10 到 13 个碳的直链烷基组成，是生产阴离子表面活性剂的主要原料，烷基苯磺酸钠是典型的阴离子表面活性剂，是合成洗涤剂的活性组分，此外，烷基苯还是生产润滑油的清静分散添加剂（烷基苯磺酸钙）的原料，也是合成液压油及采矿浮选剂、热载体等的原料。

我国烷基苯生产厂家主要有：金陵石化南京烷基苯厂，抚顺洗化厂，江苏金桐等，其年生产能力均较大，如果采购 2 万吨烷基苯，生产时间只需数月。国内生产烷基苯均采用氢氟酸烷基化技术，特点是效率较高，能长期稳定操作，但同时反应比较剧烈，副产物较多。一般认为，氢氟酸技术与固体酸技术（反应较温和，副产物较少，国外生产厂家大多采用此技术）生产的烷基苯相比，前者品质较差。但我们的研究表明，合成技术的不同，并不是烷基苯光学性能（吸收光谱）差异的决定性因素。

图 4-1 显示的是南烷厂用 HF 酸技术生产的 LAB（非市售，而是优化生产条件得到的特制烷基苯），与埃及产的 LAB（固体酸技术）相比，质量要更好，在低于 410nm 处吸光度更低，表明其中光学杂质含量也较低。此外还测量比较了这两个烷基苯 430nm 处的衰减长度，南烷厂特制烷基苯达 20 米，而 Helm LAB 仅 12 米。

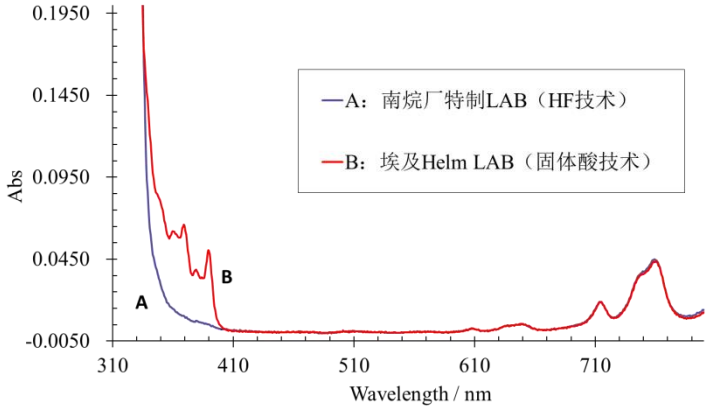


图 4-1 HF 酸技术与固体酸技术生产的 LAB 吸光度

因此，我们准备与国内烷基苯厂商合作，采用纯度更高的原料，优化生产条件，生产一批高品质烷基苯作为液闪原料。

国际上与意大利国家核物理研究所（INFN）开展合作研究，寻找更为广泛的线性烷基苯的来源，为液闪研制提供最好的原材料。图 4-2 是意大利 ISORCHEM，HYBLENE，南京烷基苯厂市售烷基苯，南京烷基苯厂特制烷基苯和经过三氧化二铝纯化后的烷基苯的吸收光谱图。

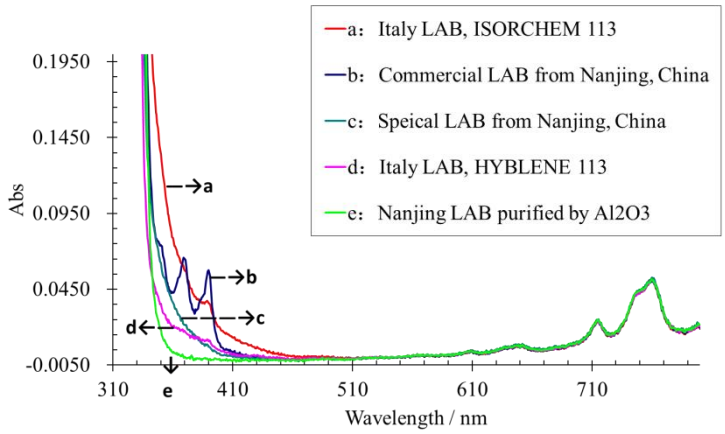


图 4-2 不同厂家生产 LAB 的吸收光谱图

为了更好的研究烷基苯的性能和配合厂家开展高质量烷基苯的生产，我们拟开展烷基苯的蒸馏纯化，过滤吸附纯化，水萃取，氮气剥离等多种纯化方法的研究。

A. 烷基苯的蒸馏纯化

蒸馏是将液态物质加热到沸腾变为蒸气，又将蒸气冷却为液体这两个过程的联合操作。简单的单次蒸馏往往难以满足复杂混合物的分离目的。

分馏是多级蒸馏。在分馏柱内，当上升的蒸气与下降的冷凝液互凝相接触时，上升的蒸气部分冷凝放出热量使下降的冷凝液部分气化，两者之间发生了热量交换，其结果，上升蒸气中易挥发组分增加，而下降的冷凝液中高沸点组分（难挥发组分）增加，如果继续多次，就等于进行了多次的气液平衡，即达到了多次蒸馏的效果。这样接近分馏柱顶部易挥发物质的组分比率高，而在烧瓶里高沸点组分（难挥发组分）的比率高。这样只要分馏柱足够高，就可将这种组分完全彻底分开。

对于烷基苯的蒸馏纯化，实验室首先搭建简单蒸馏设备（单次蒸馏），实验结果表明分离纯化效果不够好（见下图），因此采用分馏的方式对烷基苯进行纯化。分馏的效果要好于

单次蒸馏，但仍属于实验室操作，如果是工业上的大规模生产，则采用精馏（精馏塔），精馏塔就相当于分馏柱。前期实验我们使用韦氏分馏柱（又称刺形分馏柱），理论塔板数不高，但是设备简单易操作。

分馏得到的中间馏份与原液相比，去除了 330nm-410nm 的杂质，但是对于 430nm 处衰减长度并无明显改善，其原因可能为：

1) 影响 430nm 吸光度的杂质具有和烷基苯极其接近的沸点，因此难以通过蒸馏的手段去除。
2) 分馏条件控制得不好，非烷基苯组份可能发生了变化，产生了新的杂质。
3) 测量问题。具体是什么因素造成 430nm 衰减长度在分馏前后没有明显改善，需要实验进一步证实。但是可以肯定，蒸馏能去除在 410nm 以下产生吸收峰的光学杂质。

B. 烷基苯的氧化铝柱纯化

氧化铝柱纯化烷基苯的实验在实验室进行了详细研究，结果表明，氧化铝对烷基苯有非常明显的纯化效果，图 4-3：

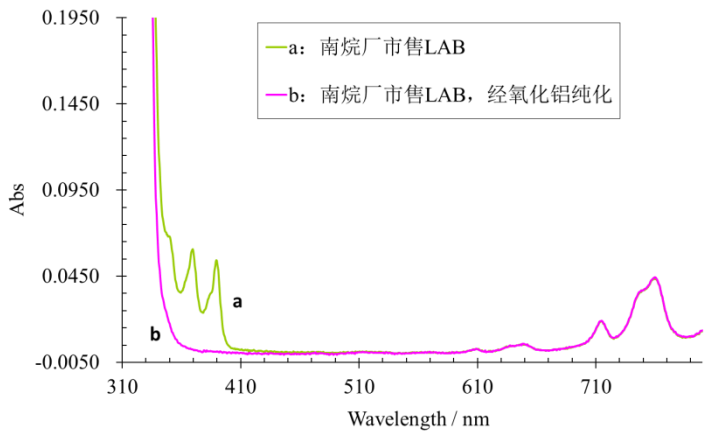


图 4-3 氧化铝纯化前后 LAB 吸光度

氧化铝不仅去除了 330nm-410nm 的杂质，还明显降低了 430nm 的吸光度。衰减长度测量表明，430nm 处衰减长度由原来的 9 米提高到 20 米。

如果采用质量较好的烷基苯，例如南烷厂特制烷基苯，作为原料，用氧化铝柱纯化，则能得到 430nm 处衰减长度达 25 米的烷基苯。

因此，与厂家合作，得到性能更好的烷基苯作为液闪原料，用氧化铝纯化后应该可以得到满足实验要求的液闪溶剂烷基苯。

下一步实验计划：

1) 氧化铝纯化条件的优化
2) 研究其它可能的柱填料，例如分子筛等。
3) 氧化铝的再生
4) 氧化铝去除的杂质的种类和含

C. 烷基苯的水萃取

蒸馏无法完全去除液闪中的放射性，因此液闪经过蒸馏，与发光物质重新混合制成液闪后，采用水萃取和氮气剥离的方法去除其中放射性杂质。

水萃取是利用不同杂质在水和烷基苯中溶解度的不同来分离一些极化杂质和游离状态

的放射性金属离子，可以高效去除放射性金属杂质如 ^{238}U、^{232}Th、^{210}Bi 和 ^{40}K 。

D. 烷基苯的气提

气体剥离主要用于分离放射性气体，可以去除 85Kr、39Ar 并去除溶解在液闪中的氧气（会引起光子的猝灭降低光产额）以及少量水（主要由水萃取带入）。

3.4.1.2 发光物质的纯化研究

实验使用的发光物质有两种，PPO 为第一发光物质，bis-MSB 为第二发光物质。两种发光物质的纯化研究思路和方法相同。

PPO（或 bis-MSB）对液闪吸收光谱的影响可以从两个角度来考察。一是发光物质本身的吸收，另一点是其中所含杂质对液闪吸收光谱产生的影响。

PPO 掺入液闪后，会对液闪溶剂的吸收光谱产生较大的影响，图 4-4。当 PPO 掺入量从 3g/L 升高至 10g/L 时，从 460nm 起至更低波段，溶液的吸光度明显上升，这将造成衰减长度降低，透明度下降。因此，有必要对 PPO 使用浓度进行必要的优化，选择最佳点，既满足发光效率要求，又满足透明度要求。

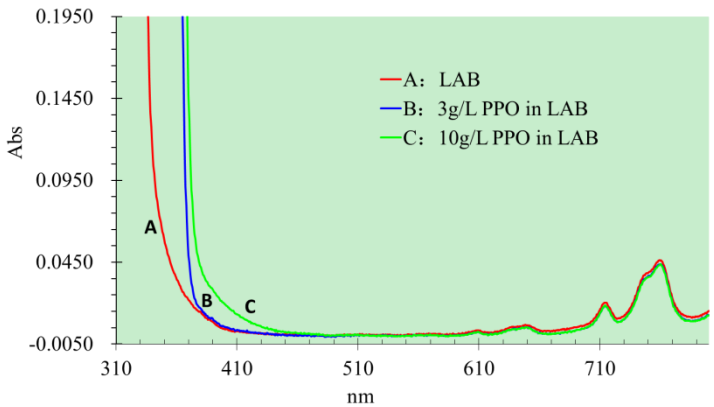


图 4-4 掺入不同浓度 PPO 后 LAB 吸光度

PPO 本身所含杂质对液闪透明度也有很大影响。图 4-4 显示的是乌克兰产 PPO 经湖北省化学研究院华硕医药化工有限公司纯化前后，溶于烷基苯溶液的吸收光谱，由图可见，对于质量较差的 PPO，纯化能明显降低液闪的吸光度，提高衰减长度。

从图 4-5 中还可以看出，rpi（Research Products International Corp）产 PPO 质量很好，和湖北省化学研究院华硕医药化工有限公司纯化后的 PPO 质量相当。

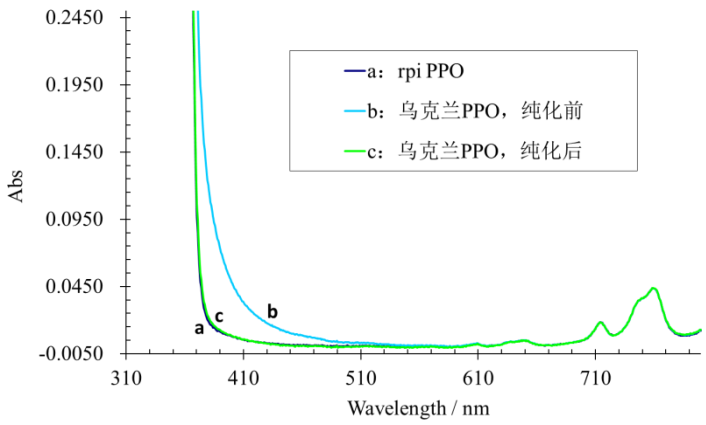


图 4-5 乌克兰 PPO 纯化前后溶入 LAB 后溶液的吸光度

当掺入第二发光物质后，同样会对液闪的吸收光谱产生较大的影响。bis-MSB 的浓度同样要进行优化，选择最佳点。

同时，bis-MSB 的纯度对溶液透明度也有较大影响。在具有同样发光效率的情况下，不同纯度的 bis-MSB 具有不同的吸收光谱，见图 4-6。如果不经过适当的纯化，将降低液闪衰减长度。

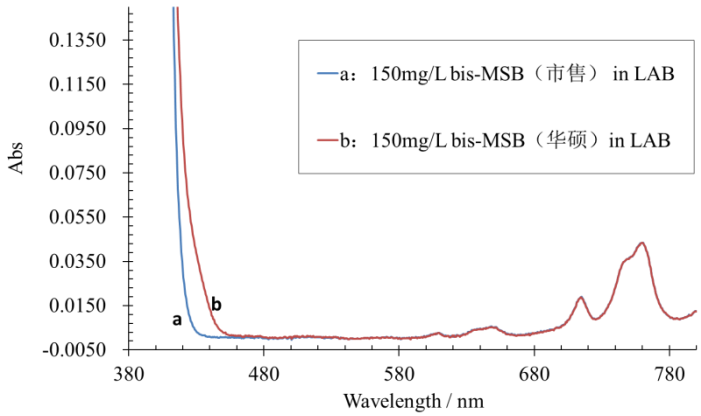


图 4-6 不同 bis-MSB 溶入 LAB 后溶液的吸光度

在大亚湾的液闪研制过程中已经与华硕公司建立良好的合作关系，他们将按时给我们提供满足实验要求的产品 PPO，bis-MSB 华硕公司正在研制阶段，从初步提供的样品看，光产额基本达到要求，吸收光谱还有待改进。由于江门中微子实验的液闪和国外中微子实验室的液闪组成上有差异，不同纯化方法对我们的液闪的放射性同位素的纯化效率需在实验室进行检验，并且不同纯化工艺的最佳工艺参数也需要摸索。

3.4.2 测量装置的研制

3.4.2.1 液闪衰减长度装置设计制作

γ射线使闪烁体发生电离、激发从而产生荧光，光子达到光电倍增管过程中，会因为散射、吸收等过程而产生衰减，设入射光强为 I_0，经过 l 长度的液体闪烁体后，光强衰减为 I，I_0 和 I 的的关系可以表示为：$I=I_0e^{-l/L}$，L 定义为液体闪烁体的光衰减长度。液体闪烁体进行发光衰减长度是表征液体闪烁体透明度的一重要标志。液体闪烁体纯化的前后，需要对液体闪烁体进行发光衰减长度进行测量来确定闪烁体的纯化效果。图 4-7 是目前我们将自行研制的一套发光衰减长度测量装置的原理图，同时还将制作一套放在 JUNO 江门现场用于液体闪烁体发光衰减长度测量。

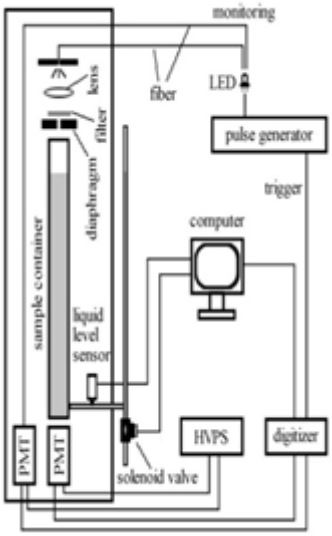


图 4-7 发光衰减长度测量装置原理图

测量装置将采用 300um 光纤作为光源，相对于大亚湾中微子实验中使用的衰减长度测量装置的优势在于光源更加稳定，测量精度更高，自动化程度更高等特点，要求测量误差小于 1m。

目前第一套测量装置已经基本完成，开始设备的调试，在完成调试后开始去离子水样的测量，在去离子水样的衰减长度达到了 40m，同时多次重复性很好后，开始大亚湾液闪的测量。在这些测量结果都与预期的基本一致的情况下，可以开始应用于 JUNO 烷基苯的纯化样品测量。第一套设备将在 2014 年年中，完成搭建和调试后，开始纯化样品的测量。第二套设备将在 2015 年 12 月以前完成设备的搭建和调试。这两个设备将长期使用，一直到液闪项目完成。

3.4.2.2 液闪光产额测量装置

优化液体闪烁体中的 PPO 及 Bis-MSB 的含量是液体闪烁体研究的重要内容，研究将先在实验室内进行，利用已有的符合测量法，来得到较为准确的液体闪烁体光产额随 PPO 及 BIS-MSB 变化的曲线。图 4-8 为测量装置原理图，在测量装置中加入了符合探测器，在没有

加入符合探测器的情况下，测量获得的光产额谱为一个康普顿平台，在数据处理时较难拟合，误差较大，如果采用符合方法测量，得到的光产额谱为一个高斯峰，可以很容易的拟合，得到较为精确的实验数据，设计测量误差小于 2%。在本课题中我们将采用这种符合法测量液体闪烁体的光产额随 PPO 及 BIS-MSB 的变化。

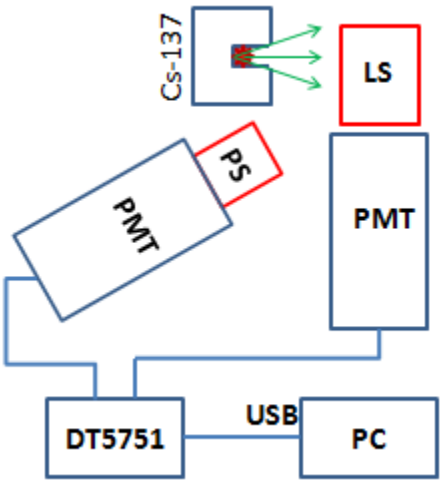


图 4-8 液体闪烁体光产额测量装置示意图

液闪光产额测量装置是一个需要长期使用的装置,目前设备已经搭建和调试完成,可以应用于液闪的光产额测量，图 4-9 左为测量装置的实物图, 图右实际测量得到的数据,这个设备将长期使用一致到项目完成，用来表征液闪的纯化、老化等效果。

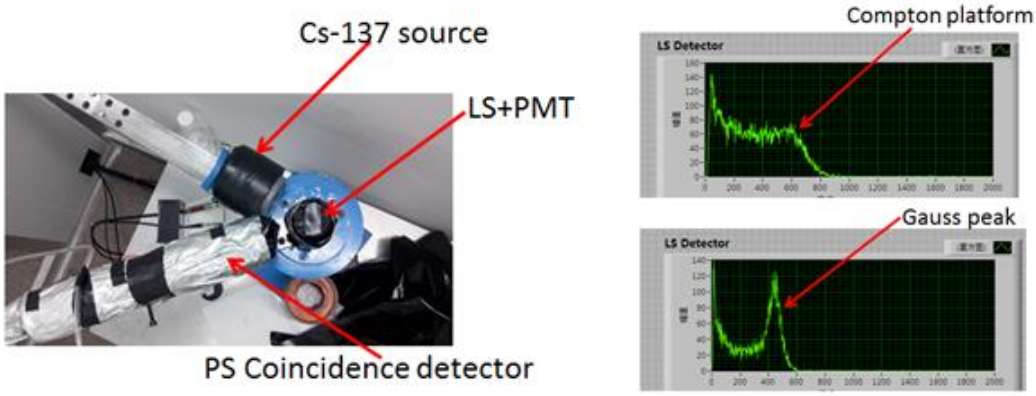


图 4-9 液体闪烁体光产额测量装置及其初步结果

3.4.2.3 液闪的长期稳定性研究（老化）装置

研究液闪与容器的兼容性及其长期稳定性是液闪性能研究的一个重要内容。根据文献，化学溶剂温度从常温（25℃）开始，每升高 10℃，反应速率提升 2.5~3 倍。我们设计 15L 不锈钢罐及其 3L 的亚克力罐，准备做了 40℃最接近实际实验条件（25℃）的液闪老化实验，液闪老化时间预计需要 6 个月，相当于探测器运行 5-10 年的液闪老化效果。

液闪的长期稳定性研究（老化），将先开始一个相对高温的实验（75°C），根据老化原理在高温的情况下可以明显的减少老化时间，可以得到一个粗率的结果，这个实验将在 2014 年中完成，图 4-10 我们正在开展的 75°C 老化实验。然后开始一个相对低的温度（40°C）进

行老化实验，在这个温度的进行的实验目的是为了排除 75°C 实验时由于高温对液闪的影响。40 °C 的实验将进行半年以上的时间，将在 2015 年年末前完成。

图 4-10 液闪在 75°C 的老化实验

3.4.2.4 液闪的温度效应研究

研究液闪温度响应的目的是为了提高液闪的光产额，设计采用的测量装置如图 4-11 所示，一个脉冲发生器驱动 LED 产生光，光通过光纤进入 PMT 用于监测 PMT 随温度的变化。将液闪罐和 PMT 系统放入控温箱内，同时将放射源和用于角度符合的探测器都放在温箱内。这样由放射源产生的信号和 LED 产生的信号，同时被获取系统获取。这样液闪的温度效应加 PMT 的温度效应能被同时记录下来，最终分析得到液闪的温度响应。测量的温度范围从-40 度到 30 度，测量误差小于 2%。

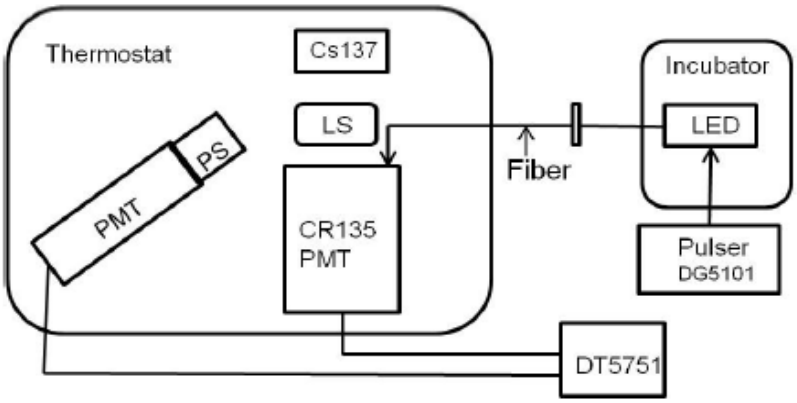


图 4-11 液闪的温度效应测量装置示意图

3.4.2.5 液闪电子能量非线性响应研究

液体闪烁体的电子能量非线性会引入中微子实验的系统误差，为了减小大亚湾实验的系统误差，我们必须详细研究液体闪烁体的电子能量非线性，从而减少 JUNO 中微子实验的系统误差。实验将采用已有的 300uCi 的 Na-22 作为 Gamma 放射源，利用康普顿散射出来的不

同角度 Gamma 作为在液体闪烁体中不同能量的反冲电子的标记，利用液体闪烁体上的光信号与不同角度 Gamma 探测器的信号的符合选择反冲电子的能量，通过同时设置 7 个康普顿 Gamma 探测器一次完成整个电子能量非线性曲线的测量。在这种情况下，可以达到快速测量的目的，减少了多次测量带入的系统误差，图 4-12 为实验装置的原理。预计这个装置测量得到对电子非线性曲线的拟合误差小于 2%，同时这个数据将应用于大亚湾中微子实验的物理分析。

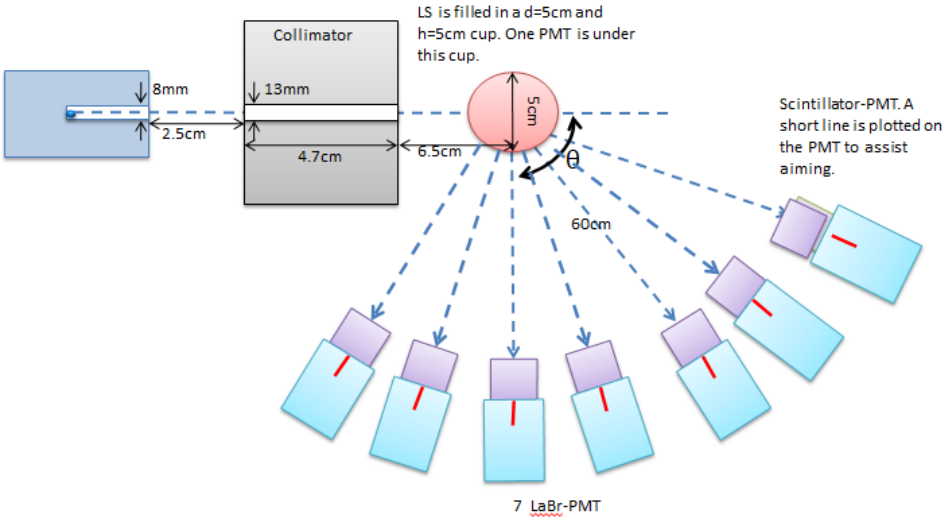


图 4-12 液体闪烁体电子非线性测量装置原理图

目前测量装置（如图 4-13 所示）基本搭建完成，实验同时获取 7 个散射角度的 Gamma 射线作为符合，采用 Na22 的 1.275MeV 和 0.511MeV 的 Gamma 射线为射线源，实验将在 2014 年年末得到了初步分析结果。同时我们还将开展高能量的 Gamma 射线源开展高能量的电子非线性研究，这个工作将在 2015 年展开，2016 年年末完成最终的实验结果。

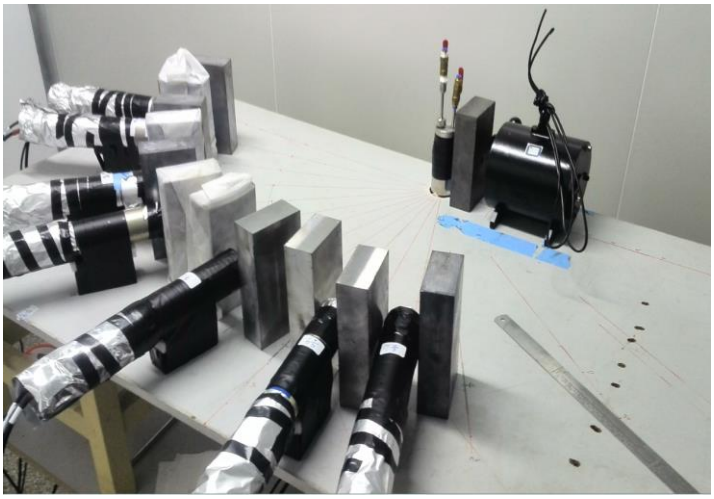


图 4-13 电子能量非线性测量

3.4.2.6 液闪的瑞利散射长度测量

液闪的瑞利散射长度直接影响到江门中微子实验的原点重建，进而影响到探测器的能量分辨及实验设计。使用 ESC 公式 $\frac{1}{l_{ray}} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} kT \left[\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T \right]^2 \beta_T \left(\frac{6+3\delta}{6-7\delta} \right)$ 进行瑞利散射长度的测量，其中 l 是散射光波长，r 是液体密度，e 是液体平均介电常数，K 是 Boltzmann 常数，T 是液体温度，b_T 是液体等温压缩率，δ 是去极化率，我们可以通过测量其折射率，等温压缩率及去极化率来得到 LAB 的散射性质。相比于直接测量，这种测量方式既可以将系统误差最大的去极化率测量通过相对测量的方式进行降低，又可以通过递推得到我们所关心的不同入射波长的液闪瑞利散射长度。图 4-14 是测量原理示意图。

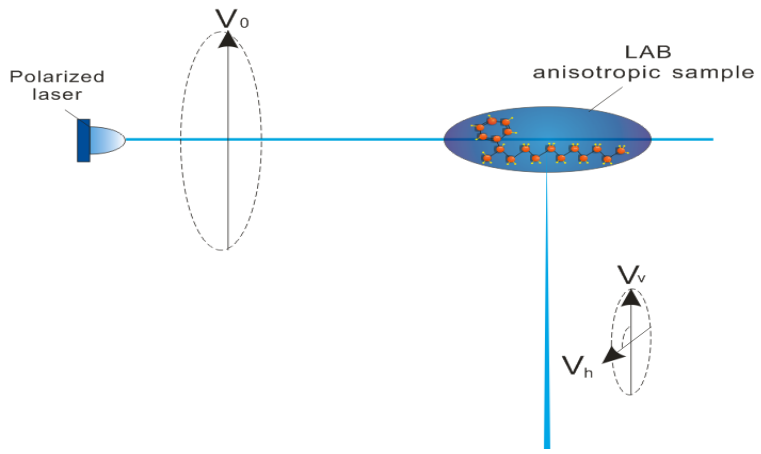


图 4-14 液闪的瑞利散射长度测量示意图

3.4.2.7 极低本底氮气

放射性金属元素可以用水萃取来去除，但会在烷基苯中留下水。而水和稀有气体放射性元素可以用氮气剥离来去除。氮气剥离就是用大量氮气通过烷基苯，从而带出水和放射性稀有气体。由于氮气是和烷基苯直接大量接触，所以必须保证但其中的放射性元素含量要远低于烷基苯中的含量，用低本底氮气可以大大地降低液闪中的放射性稀有气体。制作低本底氮气的基本原理是让普通氮气通过一个浸泡在低温液氩冷阱中的吸附管，吸附管中装填有吸附物，吸附物能在低温下吸附氮气中的放射性稀有气体。图 4-15 是低本底氮气的制作示意图

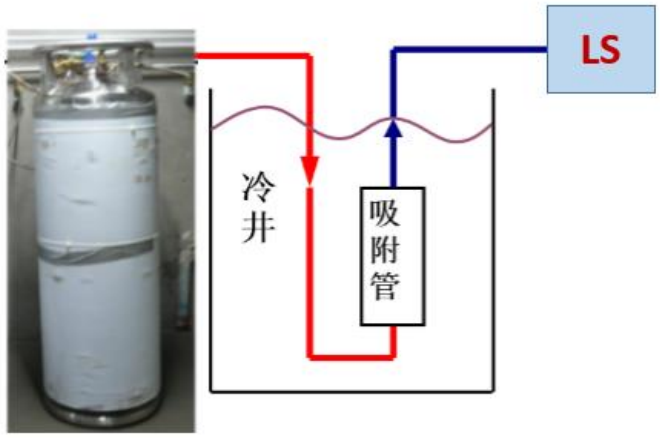


图 4-15 低本底氮气的制作示意图

3.4.3 放射性纯化预研计划

江门中微子实验对液闪的光衰减长度有很高的要求，不同的纯化工艺对光衰减长度有没有影响也需要仔细研究。

液体闪烁体中放射性杂质的来源有：

i) 含有 K、U 和 Th 的灰尘颗粒

ii) 建筑材料（如花岗岩、砖砂、水泥、石膏等）释出的 ^{222}Rn

iii) 漏进去系统里的空气中所含 ^{85}Kr 和 ^{39}Ar

iv) 经 ^{222}Rn 暴露后，沉积在液闪容器表面的 ^{210}Pb(产生 ^{210}Po 和 ^{210}Bi 背景)

v) 未知来源的 ^{210}Po

vi) 来自发光物质的 ^{40}K

v) 未知来源的 ^{210}Po

vi) 来自发光物质的 ^{40}K

自然环境中所含的放射性物质主要是 K、U 和 Th 以及他们衰变链上的放射性同位素。天然土壤中 U 和 Th 链的放射性活度大约为 200Bq/kg，折合到液闪中所含尘埃量不能超过 10g。液闪极易溶解氡，氡在液闪和水中的溶解度的比值为 12.2:1。放射性氡在空气中活度大约为 20Bq/m3。也就是 2 万吨液闪不能吸收超过 0.1m3 的空气中的氡。另外液闪接触到的材料表面也会释放氡到液闪中。释放的多少与材料内部的 U 和 Th 含量和材料表面积有关。对液闪的放射性纯化装置的研究要遵循先搭建实验室小型的纯化设备，研究各种纯化方法的效果，以及最佳的工艺参数。在此基础上再制造中试装置，在更大规模的更灵敏的测量装置上测量天然放射性浓度的纯化效果，最后再建立工业级的纯化装置。

液闪放射性纯化实验室研究：如图 4-16 及图 4-17 所示，利用流气式固体 ^{220}Rn 源向液闪中加载示踪核素 ^{212}Pb，通过测量 212Pb 及其子体的活度研究各种放射性纯化方法的效果，图 4-18 为测量装置示意图。在完成实验室研究的基础上，根据结果建立一套放射性纯化的中试设备，处理能力是 25L/h。利用大亚湾 1 个 AD 探测器，进行液闪放射性纯化的测试研究。大亚湾中微子实验厅位于地下 100 多米，AD 探测器含有 20 吨掺钆闪。通过纯化原有的掺钆液闪来测量液闪中的天然放射性本底，研究放射性纯化设备的纯化水平。对以后工业级的大规模设备提供依据。

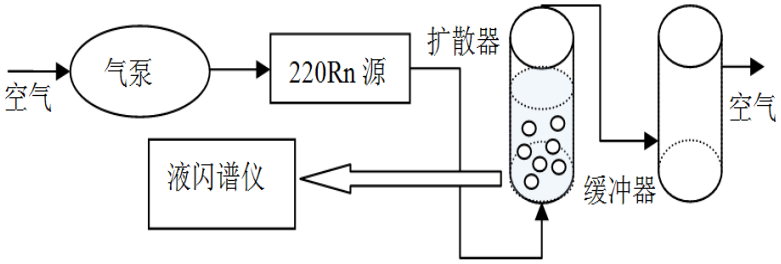


图 4-16 液闪中加载氡的实验示意图

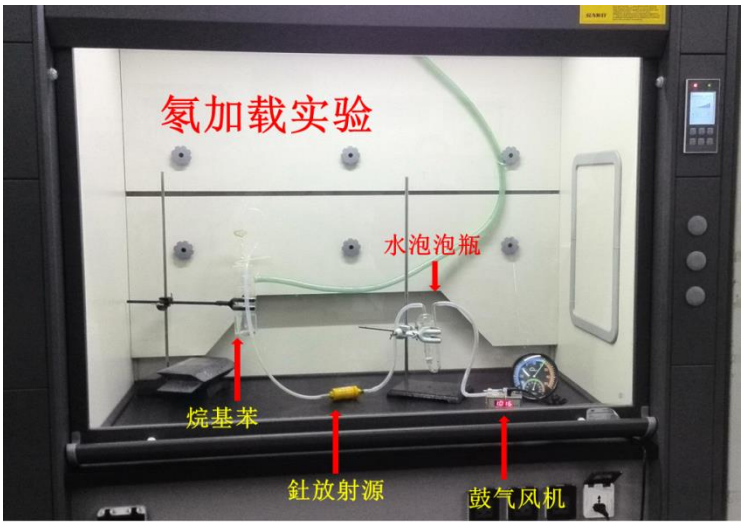


图 4-17 液闪中加载氡的实验装置

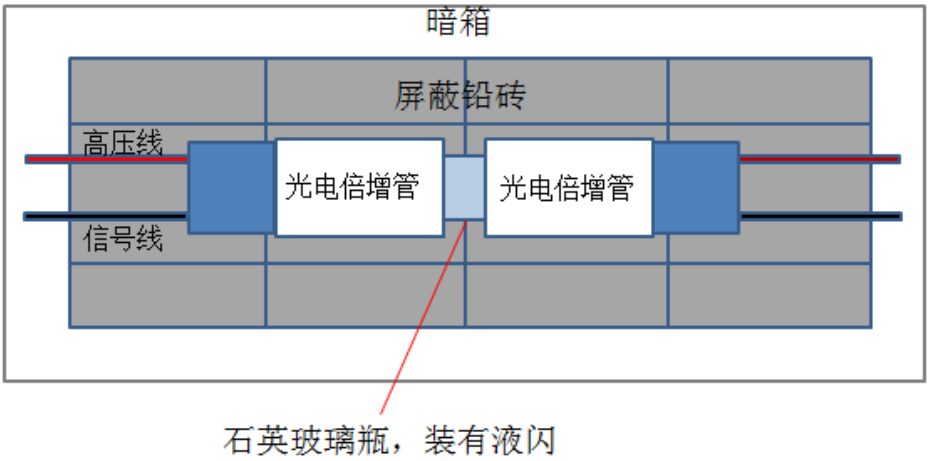


图 4-18 液闪放射性活度测量示意图

要达到如此低的放射性本底，需要对液闪进行纯化。对液闪中放射性杂质的纯化包括蒸馏，水萃取，氮气剥离和离子吸附等几种工艺。

蒸馏是一种利用溶液中各成分沸点不同，挥发度不同来去除杂质的方法。对放射性金属离子由于沸点差异大，蒸馏可以达到很好的纯化效果，纯化系数可达 500±90 左右（见 Borexino 博士论文）。由于液闪中作为溶剂的烷基苯和溶质 PPO 和波长位移剂 bis-MSB 之间沸点差异较大，蒸馏时会分离溶剂和溶质使组分发生变化。所以蒸馏适合于初次纯化。烷基苯，PPO 和 bis-MSB 分别蒸馏纯化后再混合成液闪溶液。为降低加热温度和能耗，对液闪各

组分的蒸馏应采取减压蒸馏的形式。初步设计蒸馏塔为多级塔板的减压蒸馏塔，处理速度是5000L/hr，处理温度是~100 C 左右，具体的参数还要在实验中确定。图 4-19 为蒸馏的示意图及装置图

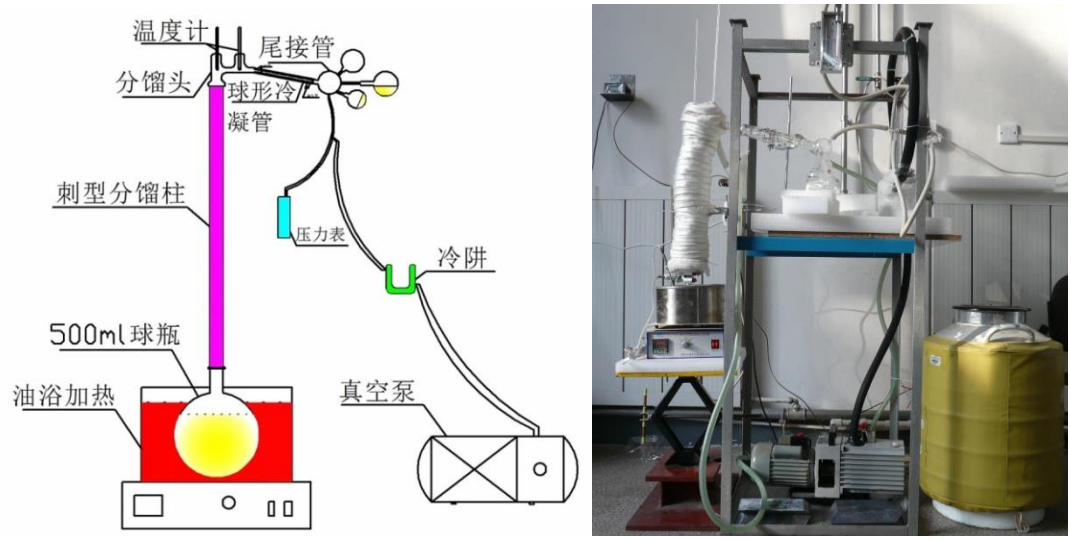


图 4-19 液闪蒸馏实验装置

目前发现蒸馏的过后烷基苯的衰减长度会减小，并且加热温度过高或加热时间过长会变色和产生刺激性气味，可能有某种杂质遇热易分解，需要在蒸馏工艺和流程上考虑减小热敏物质易分解的措施，以防止烷基苯光衰减长度缩短的问题。由于蒸馏过程耗费能量比较大，蒸馏装置可以建在烷基苯厂，在烷基苯的存储运输和灌装各个环节注意密封和氮气保护措施以防止空气中的氡污染。

水萃取是利用极性的水分子来分离一些极化杂质和放射性的游离状态的金属离子来达到纯化烷基苯的目的。在纯化塔中包含一个逆流放射工作的水萃取柱。纯水在顶部加入，而液闪在底部进入，经过充分混合，萃取后的液闪在顶部分离出去，而水通过排水系统从底部排除。萃取塔内部采用多孔填料使两种液体充分混合。水萃取对一般的放射性金属离子纯化效率也比较高，纯化前后96.5%的镭可以去除，但对Pb和Po效果不好，清除率只能到82~87%。因为 Pb 和 Po 可以和溶剂有机分子相结合在常温下很难去除。（见 Borexino 和 SNO+文章）。

气体剥离主要用于分离放射性气体氩氪氡，还有氧气（会引起光子的淬灭降低光产额）。一般气体采用高纯氮气，但是需要采取特殊工艺降低放射性惰性气体氩、氪和氡。

Al2O3 吸附柱对化学杂质去除很有效，但是对放射性同位素的纯化还需实验检验。从国外实验室的结果可见多孔硅吸附对含氡液闪中的放射性子体吸附很有效，系数为：550 for 210Po and 150 for 210Pb（见 Borexino 博士论文）。

要制备出低本底的液闪，对液闪的整个系统：纯化系统，存储系统，管路阀门泵等都要有的很高的密封要求以防止空气接触，空气中的氡会渗人液闪。对液闪接触的材料也要低本底，并且表面要有足够的光洁度以减少材料内部氡的扩散。对接触液闪的罐体，管路，纯化装置要严格的清洗，以减少尘土中放射性同位素的混入。在液闪纯化，存储，灌入等全过程都要有高纯氮气覆盖，以隔绝空气。

2 万吨这么大量的液闪纯化达到如此低的放射性本底水平，对江门中微子实验液闪研制提出了一个很大的挑战。

3.5　2 万吨液体闪烁体批量生产

2 万吨液闪的批量生产，由烷基苯厂提供符合质量检测标准的烷基苯，检测标准是由高能所和烷基苯厂经过联合研究制定的，2 万吨烷基苯大概分 3-4 次在 1-2 年内完成。烷基苯的运输由专业的运输公司负责完成，包括从烷基苯厂家生产线装载，集装箱运输港口，再用汽车运输到江门实验基地，高能所负责提供烷基苯的包装袋。包装袋由专门厂家生产，材料满足对烷基苯的兼容性，袋子生产符合实验对烷基苯的洁净要求。

考虑到 2 万吨烷基苯大概分为 3-4 次生产，需要 5000 平方米地面存储地盘，包括几个 3 千吨和几百吨的存储池（包括白油存储），还需要一些地面堆放暂时不能卸载完的集装箱。

发光物质 PPO 和 bis-MSB 由生产厂家按照联合研制的检测标准提供合格的产品，在江门现场抽样用烷基苯溶解后检测溶液的的质量。

目前初步设计对烷基苯和液闪的纯化包括初级纯化和在线循环纯化两个过程。烷基苯的纯化在地面进行，经过蒸馏，Al2O3 吸附，水萃取和氮气剥离等过程去除放射性杂质，提高烷基苯光学性能，通过质量检测的烷基苯与发光物质溶液与混合制成合格的液闪，通过管道送入地下存储池，供中心探测器使用。图 4-20 为液体闪烁体纯化流程图。

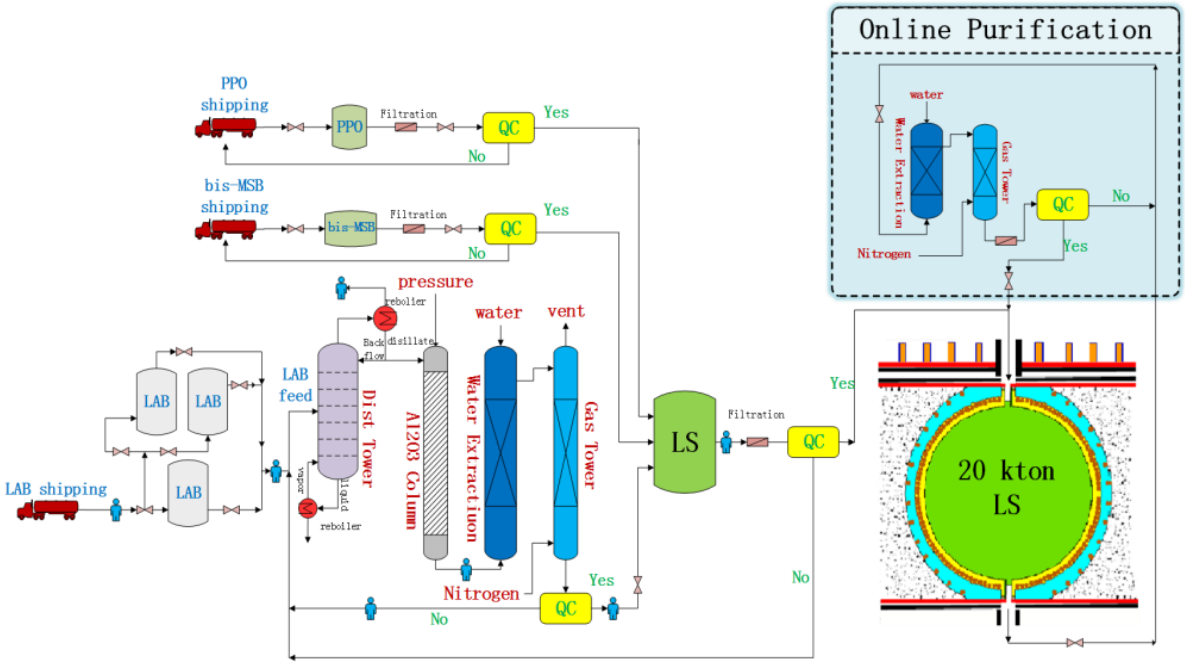


图 4-20 液体闪烁体纯化流程图

bis-MSB 在烷基苯中溶解度较小，溶解较慢，因此每个批次混制前，需将 bis-MSB 和 PPO 预先溶于烷基苯中形成十倍浓度的浓溶液，再参与配制。这样可以保证 bis-MSB 和 PPO 溶解完全，每个批次液闪发光物质含量一致。

混制框图如下，图 4-21 是初步设计的液闪纯化示意图，

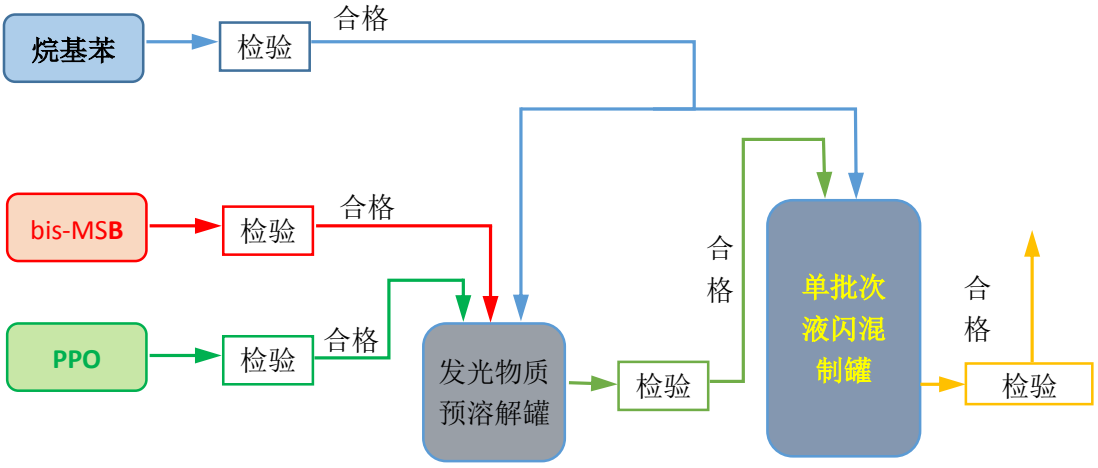


图 4-21 液闪纯化后的混制框图

液闪的混制设备中，各混合罐均采用有机玻璃，原因有二：1）有机玻璃与液闪是兼容的，不会对液闪造成污染。2）有机玻璃是透明的，便于混制过程中直接观察。

液闪混制过程质量控制非常重要。由于是分批次生产，然后灌装到同一个探测器中，即使有一批不合格的液闪进入探测器，都会降低液闪品质，给整个实验带来毁灭性的后果。实验中，每个步骤都将根据实情况制定严格的质量控制（QA/QC）条款。这些条款分为两个部分，一部分供括操作人员使用，一部分供质检人员使用，每个步骤操作或检测均需得到现场负责人的签字许可，才能进行下一步操作。确保每一批次的液体闪烁体都是满足实验要求。

由于液闪总量达到 20000 吨，如果要在 200 天内灌装完毕，液闪纯化装置的设计能力要达到 100 吨/天。参考 KamLAND 和 SNO+如果有蒸馏，水萃取氮气剥离等纯化方法用电大约 1600KW, 如果不考虑蒸馏，仅考虑水萃取，气体萃取 约 1000KW，超纯氮气 200 立方米/小时，超纯水 6 吨/小时。

如果在地面纯化，需要超过 300 平方米的高度为 10 米左右的洁净间，作为 LAB 和 PPO,Bis-MSB 的预纯化，需要液闪混制房间 200 平米，另外需要 2 个质检间分别为 40 平米和 20 平米，质检间中将包括，可以做烷基苯杂质分析 GC-MASS，可以做液闪的发光衰减长度、光产额、吸收光谱等多项测量的设备。PPO 存储室 30 平米，纯水生产 30 平米，氮气系统 30 平米（作为纯化液闪的高纯氮）。在地下有可以储存液闪和白油各 200 吨的空间。

在液闪存储生产环境中必须有安全视频监控设备，有火灾监测报警，有有害气体检测报警设施，有氧含量监测设备。

烷基苯的纯化完成后，将地面的水萃取和氮气剥离系统系统移至地下，作为将来液闪的在线纯化系统。

如果在地下纯化，有 2 个 500 平方米的硐室供液闪纯化，混制使用，水，电，气要求基本和地面一致。

3.6 风险分析

实验中主要探测器由液体闪烁体和矿物油构成。

液闪的主要成分为直链烷基苯(LAB)，凝固点低于－50 摄氏度，不溶于水。分子式

C6H5CnH2n-1（n=10-13），该产品为无嗅无味无毒无腐蚀的无色透明液体，凝固点低于-50 摄氏度，不溶于水，该产品属于可燃液体，闪点为 135 度。自燃温度 338 度。

- 蒸气压（20℃）< 0.1 mmHg
- 密度 0.855-0.870 g/cm3, 分子量~242
- 用于制取阳离子表面活性剂，继而生产洗衣粉、液体洗涤剂、农药乳化剂、润滑剂、分散剂等。

探测器还需要使用大约 7000 吨矿物油。工业上即为 10 号食品级白油，其主要特性为：

- 本产品为由石油的润滑油馏分经深度加氢精制而得到的食品级白油。本品系无色、无嗅、无味、无荧光透明的油状液体。可燃液体，闪点 145 度。
- 蒸气压（20℃）< 0.1 mmHg
- 密度 0.815-0.84 g/m3
- 用途：适用于食品上光，防粘、脱模、消泡、密封，抛光和食品机械、手术机械、制药机械的防腐、润滑及延长酒、醋、水果、蔬菜、罐头的贮存期等。

LAB 和矿物油都是无毒物质，但属于可燃物质，安全问题主要就是防燃烧，主要采用常规防火措施，根据实际情况增加其他措施以确保安全，整个实验的安全措施需要考虑液体闪烁体制作过程和探测器运行过程。

由于烷基苯是在远离实验现场的工厂中生产完成，所以在运输过程中有多次的运输工具的传送，存在泄漏造成二次污染的危险，对包装材料需，传输管道，储存容器的压力承受需仔细考虑。在生产液闪的过程中，有大量的烷基苯需要在现场储存，所以储存现场需要有防火防渗漏的考虑。

液闪的一些纯化，储存设备安装的工作在都要在地下 700 多米处的受限空间内完成，需要
设计制定复杂吊装、高空作业、精确定位等技术手段，实现多部件的整合，这些都需要仔细统筹安排。

3.7 时间安排和经费预算

3.7.1 年度计划：

2013 年：通过建立起液闪基本性能测量的多套（台）设备，对液闪性能有更深刻的理解，为下一步研究指出方向。开展烷基苯杂质成分分析，开展瑞利散射去极化率是测量散射长度研究，为实现测量精度 15%在±90°时的瑞利散射去极化率的实验做准备。

2014 年：在实验室搭建各种小型的纯化装置，研究各种纯化工艺的效果，确定最佳的技术参数。实验室建立减压蒸馏装置和 Al_2O_3 吸附柱，开展氮气剥离和水萃取的初步实验，对纯化前后的 LAB 测量光产额、光衰减长度，吸收光谱，水含量。
建立在 LAB 中注入 ^{212}Pb 和 ^{224}Ra 的工艺，搭建放射性测量平台，测量纯化前后液闪的放射性含量，研究纯化效率。

开展实验室小型纯化液闪的研究，确定纯化的相关参数，测量纯化前后的光产额，衰减长度，吸收光谱．完成特殊角度瑞利散射去极化率散射长度测量。

从 2014 年开始直到 2018 年正式开始烷基苯的批量生产一直和相关厂家保持合作研究。

对不同方法生产出来的样品测量其各项性能指标，直到找到适合液闪要求的生产工艺

2015 年：

A、设计制造大亚湾 AD 探测器的纯化系统

根据以上实验室研究，与有关化工厂及化工大学，联合开展纯化设备的研制。纯化技术包括蒸馏、吸附、萃取、氮气剥离等手段。

B、建立纯化工作的外围条件

超纯水系统的建立，利用大亚湾的超纯水系统，水电阻率达到约 18.MΩ/cm² 以上，提供液闪水萃取之用。建立纯化用的超纯氮气系统，用特制超纯氮系统纯化液闪的惰性气体。

C、开展实验室电子能量非线性的测量。

D、加工、研制、调试及购买现场液闪纯化质量检测设备，在大亚湾现场开始安装调试

E、与 PPO，Bis-MSB 生产厂家开展合作研究，制定 PPO，Bis-MSB 质量检测方法

2016 年 1 月~6 月 安装调试纯化设备，2016 年 7 月~2018 年 12 月 调试、运行中型纯化系统，完成一轮纯化后开始物理取数，分析数据，检验纯化效果，根据实验数据物理分析对纯化方法做相应调整。

2017 年 根据实验数据确定中微子实验液闪的配方，测量给出液闪最终的光产额，衰减长度。完成与烷基苯纯化设备厂家的合同签订， 开始大型纯化设备的设计加工。与 PPO，Bis-MSB 生产厂家签订生产合同，开始建立批量生产线，年底开始批量生产。完成 LAB 的存储设备的调研。

2018 年 完成 LAB 的存储设备的合同签订。2018 年中旬在开平实验现场建立 3-5 个 3 千立方米-1 千立方米的 LAB，液闪，白油的存储罐，2018 年底开始纯化设备的安装。完成地下 2 个 200 吨缓冲罐的建立。

完成现场液闪检测设备的建立和调试。

2019 年 6 月以前完成液闪纯化设备的调试，完成纯化需要的辅助设备超纯水和超纯氮气系统的安装，完成全部纯化设备的联调。

2019 年底完成 8 千吨液闪的生产，可以提供中心探测器组灌装

2020 年 3 月底以前完成全部液闪生产，6 月以后将水萃取和氮气剥离纯化系统移至地下液闪实验大厅。

3.7.2 经费初略预算

R&D 研究			约 950 万，
烷基苯	1.4 万/吨	2 万吨	约 2.8 亿（包括运输，包装）
PPO	60 万/吨	70 吨	约 4300 万
Bis-MSB	20 万/公斤	300 公斤	约 600 万
白油	1.4 万/吨	7 千吨	约 1 亿 （包括运输，包装）
存储设备			约 1200 万
纯化设备			约 1500 千万
混制设备			约 750 万
人工费			约 400
电费			约 700 万
管理费			约 1000 万（出差，会议等）

总计约 4.5 亿

参考文献：

[1] Borexino cooperation， NIM A 600 (2009) 568－593
[2] Borexino LS group, http://astronu.jinr.ru/wiki/upload/3/36/Seminar_Ianni_15_12_2008.pdf
[3] Fujikawa, http://phys.msu.ru/rus/about/virtual/mtg-lomonosov-13/PDF/24.08.07/Morning/Fujikawa.pdf
[4] F. Suekane http://hcpl.knu.ac.kr/detector/internal/Documents/LSc/KamLand_1KiloTon.pdf
[5] Mark Chen, http://www.ipp.ca/pdfs/SNOp_chen.pdf

第4章 江门中微子实验反符合探测器系统

4.1 探测器的设计目标和要求

江门中微子实验首先将测定中微子的质量顺序。这是目前国际竞争的最前沿，具有重大的科学意义，研究将涵盖目前中微子未知问题的大部分，使我国成为国际中微子研究的中心之一。

中微子探测器观测中微子反β衰变反应产生的正电子与中子信号，实验最终对中微子能谱进行精确的测量，虽然中微子主探测器有着精心的设计，但由于中心探测器的体积大，信号事例数非常少，40 个/天，因此实验数据的本底非常高，其中宇宙线 muon 为主要的本底来源，并且由宇宙线引起的本底很不容易去除，宇宙线的主要本底来源于：1.muon 产生的高能中子在中心探测器形成的快中子本底，2.muon 散裂产生的 Li9/He8 关联本底。为了减小实验的本底，中微子探测器必须放在足够深的地下，同时必须设计反符合探测器，使对 muon 子实现高探测效率测量以去除本底。本章节主要介绍反符合探测器的系统相关的研究和设计。

由于实验中本底要求比较高，因此需要比较厚的岩石覆盖，以此来压低宇宙线带来的本底。实验选址在位于阳江和台山核电站等距 53 公里的位置，山的高度为 270 米，实验厅位于地下 460 米处，地上顶部垂直位置岩石覆盖 700 米，通过模拟研究得到 Muon 的事例率为 0.0031Hz/m^2，Muon 的平均能量为 214GeV，宇宙线流强比地表小 60000 倍。剩余的高能宇宙线在中微子探测器周围的岩石中也能产生大量的中子，这些中子能漂移到中心探测器中形成本底。这部分本底也不可忽略。为了屏蔽这些中子以及岩石中的天然放射性，中微子探测器周围将用 2 米以上的水屏蔽（图 4-1）。同时可以基于水建立一个主动的反符合水契仑科夫探测器，大亚湾 1 期对此已有很成功的经验。 根据已有的探测器的模拟计算，探测器对长径迹的 muon 有非常高的探测效率，而未探测到的 muon 主要为短径迹的 muon，这些 muon 带来的本底比较小，根据大亚湾的实验数据（快中子本底 ~0.2%），如果江门中微子实验水屏蔽层的厚度为 2.5 米厚，考虑探测器的体积以及几何效应后，最终江门中微子实验估算的快中子引入的本底为~0.3%。

宇宙线产生的另一个本底是 muon 与液闪中的核素相互作用产生的产寿命同位素 Li9/He8 引入的本底。江门中微子实验不能依靠增加水屏蔽的厚度来降低宇宙线引入的 Li9/He8 本底，宇宙线引入的 Li9/He8 本底可以通过精确的 muon 径迹重建，通过在 muon 入射后一定时间内扣除以 muon 径迹为中心的半径为 5 米垂直的桶状区域内的事例的方法对 Li9/He8 本底进行排除，这个本底的扣除依赖于主探测器内 muon 字的精确重建，另一个对 moun 可以进行精确重建的方法是在水契仑科夫探测器的顶部建造一个顶部的径迹探测器，通过位于不同高度的多层 muon 径迹测量重建 muon 径迹，独立于主探测器，并把它外推到主探测器内，与主探测器径迹重建进行比较，独立的研究 Li9/He8 的本底的大小。由于主探测器很大，入射到水池的 muon 即便不直接穿过住探测器，也有可能通过 muon 散裂产生高能的 gamma，入射到主探测器在主探测器内产生 Li9/He8，简单的模拟计算表明这种不能被中心探测器重建所扣除的本底大小与宇宙线在中心探测器引入被扣除后的本底误差相当(~1.2 个/天)，一个体积较大的顶部径迹探测器，可以直接对此类本底进行测量。通过对顶部探测器面积和摆放方式的优化，最终考虑顶部探测器的摆放结构为一个长条形结构，可测量

到 1/4 左右的此类本底，从而可实现对此类本底的研究；另外长条形结构还可以测量研究岩石中子相关的本底。

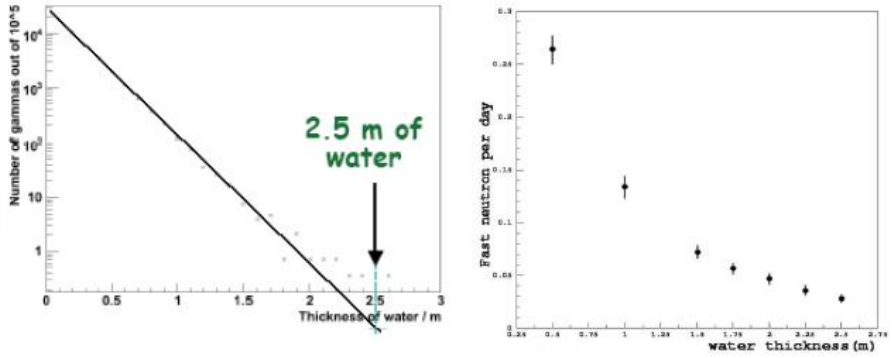


图 4-1 左图：屏蔽水厚度与 gamma 水平的关系； 右图：屏蔽水厚度与快中子本底水平的关系。

4.2 探测器的设计

江门中微子实验的反符合系统，如图 4-2 所示。包括有以下的系统组成：

1. 水契仑科夫探测器系统，外部的水屏蔽的纯净水中安装光电倍增管（PMT），位于水池桶部和中心探测器球罐外部的反射有 Tyvek 反射膜组成，muon 入射到水中产生的 Cerenkov 光，可以被 PMT 直接接收，没有接收到的一部分光子可以通过 Tyvek 的多次反射后被 PMT 接收。
2. 水循环净化系统，取决与不同的主探测器设计，位于水池内的纯净水有 20000-30000 吨，由位于地面的制水系统和位于底实验厅内的循环净化部分组成。
3. 顶部径迹探测器系统，提供 muon 径迹信息，有助于 muon 重建，现有三种备选方案，OPERA 的闪烁体方案，液闪+光线方案，RPC 方案，须经过对探测器的预研和优化设计，最终确定一种方案作为顶部径迹探测器的方案。
4. 地磁屏蔽系统，通过线圈和磁屏蔽材料进行地磁补偿，降低地磁场对 PMT 性能的影响。
5. 机械安装系统，包括了顶部径迹探测器的支撑结构，水池内 PMT 的支撑结构，水池光密封和气密封的顶盖单元组成。

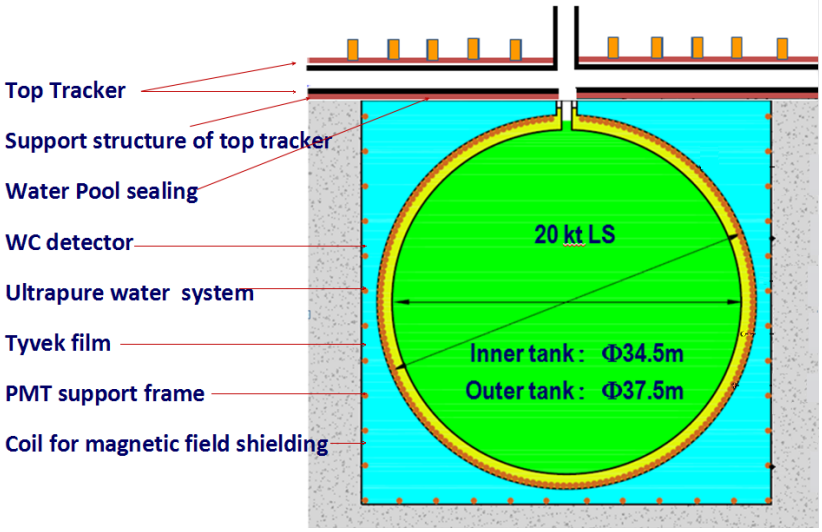


图 4-2 **反符合探测器各个系统**

下面将详细介绍探测器的各个部分的设计。

4.2.1 水契仑科夫探测器

在水屏蔽层中放置光电倍增管，用来探测宇宙线在水中产生的契仑科夫光，以标记宇宙线，探测效率根据已有大亚湾 1 期的经验以及 Geant4 模拟计算，在实验厅的水屏蔽层在保持 2.5 米水厚情况下，采用 1600 个 8 英寸光电倍增管时，muon 的探测效率在约为 98%（图 4-4 所示），同时保持噪声在较低的水平，跟大亚湾实验在一个水平上。针对长径迹的 muon 有非常高的探测效率，如图 4-3 所示为大亚湾实验通过中心探测器的长径迹 muon 的效率随时间的变化图。而没有探测到的为短径迹的 muon，短径迹的 muon 对本底的贡献非常小，因此江门中微子实验不再采用区分内外两层的水契仑柯夫探测器的反符合系统。由于江门中微子实验中心探测器更大，外部的不锈钢罐对光的传输影响更大，我们对此进行了模拟计算，对探测器性能没有大的影响。基于大亚湾的实验数据通过对比计算，江门中微子实验的宇宙线引入的快中子本底与信号比为 0.3%。

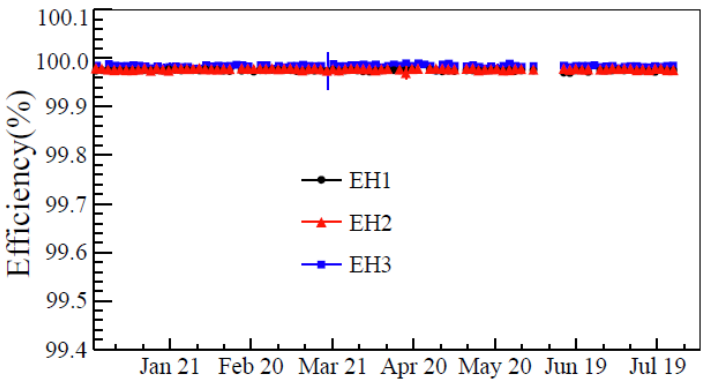


图 4-3 通过中心探测器长径迹 muon 的探测器效率随运行时间的变化图

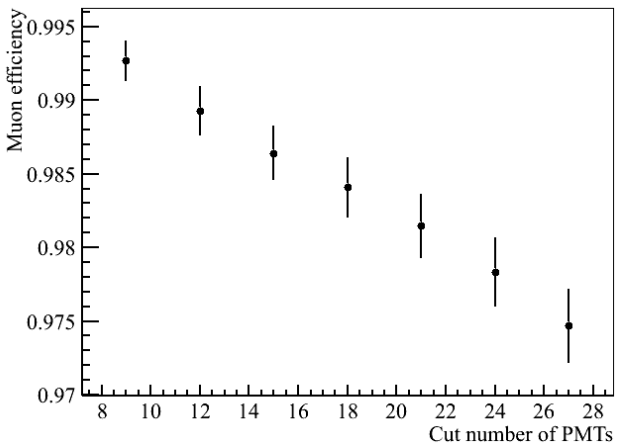


图 4-4 探测效率与设置 PMT 个数阈值之间的关系(外部使用 1600 个 PMT，阈值设置在 20 时，可以满足实验要求，探测效率>95%)。

针对 PMT 的位置摆放，需要根据不同的中心探测器的方案，需要进一步的优化；将来针对 PMT 的使用，有可能使用 20 英寸的自制 PMT，将适当减少 PMT 的使用数量。

4.2.1.1 Tyvek 反射膜

Tyvek 反射膜作为一种反射材料，由于反射率高，性能稳定被广泛应用于反符合水契伦科夫探测器当中，大亚湾实验也采用 Tyvek 作为反射膜用于水契伦科夫探测器当中。在江门中微子实验中，Tyvek 反射膜将覆盖水池内壁和主探测器的外层，使在水池中产生的契仑科夫光子能够经过多次反射被 PMT 接收，从而在尽可能少用 PMT 的同时，提高水契仑科夫探测器的探测效率。下图 4-5 所示为实验 Tyvek 制作的过程，Tyvek 为宽度为 1 米左右的，长度没有限制的的成品，制作的时候需要把不同的片的 Tyvek 焊接起来做成大片以方便探测器的安装，

图 4-5 大亚湾实验中 Tyvek 反射膜的制作过程

Tyvek 反射膜的性能，空气中 Tyvek 反射率的测量曲线如图 4-6 所示，看到不同型号的 Tyvek 的反射率，反射率主要跟 Tyvek 的厚度有关系，Tyvek 厚度越厚，反射率越高。大亚湾实验使用两层厚的 tyvek1082D，中间夹 PE，形成三层的 Tyvek 复合膜，图中红色点所示，在波长大于 300nm 的范围内，复合 Tyvek 反射率>95%。

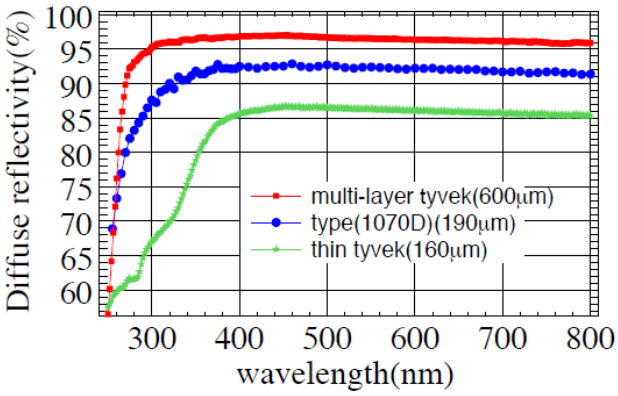


图 4-6 所示不同型号 tyvek 的反射率

4.2.2 水循环净化系统

对于江门中微子实验反符合系统，由于需要超纯水体积大，而且材料多，体积大，包括不锈钢、Tyvek、光电倍增管、线缆、各种探测器等，环境复杂，密封难，长时间自然保持水质几乎是不可能的，因此需要建造一套超纯水生产、净化、循环系统。

水循环的另外一个功能是保持整个探测器的温度恒定。中心探测器的温度稳定对于整个实验至关重要。江门中微子实验位于中国南方，周围岩石温度 32 度，探测器温度拟维持在 20 度，而水又是优良的热导体，通过降低进入水池的水的温度，以抵消周围岩石对探测器的加热是实验自然的选择。

大亚湾实验近厅 1300 吨水，远厅 2000 吨水，产水速率 8 吨/小时，净化速率 5~8 吨/小时。要十几天循环一个体积，水契仑柯夫探测器的探测效率高达 99.9%，性能并且长期保持不变。水净化系统的设计完全满足实验要求。

江门中微子实验水契仑柯夫探测器超纯水有 20000-30000 吨水，基于大亚湾的经验，2 个星期循环一个体积，循环流量相应为 80 吨/小时，这样可以保持探测器有良好的水质，同时实现对水池水温的保持。下图 4-7 所示为基于江门实验 2 个主要中心探测器的方案来对水循环净化系统进行的设计，关于流量和循环天数之间的关系。红线所示的位置为未来设计的流量循环量，约 80t/hour，需要循环的天数在 16~20 天左右，可以满足实验的需求。

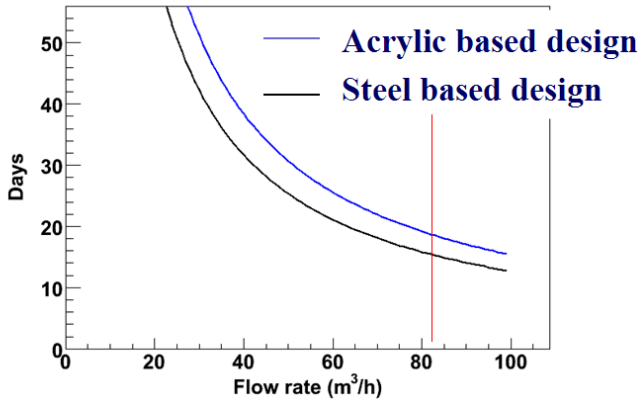


图 4-7 循环速度与周期的关系

水循环净化系统的设计上，将水系统分为产水和循环 2 个部分，其中产水又分成地上和地下 2 部分，之所以这样设计，是因为地下 500 多米深，有严格的废水率要求 5 吨/小时，我们把产生大量废水的 RO 部分放到地面，以节省实验开支。

4.2.2.1 地面产水部分

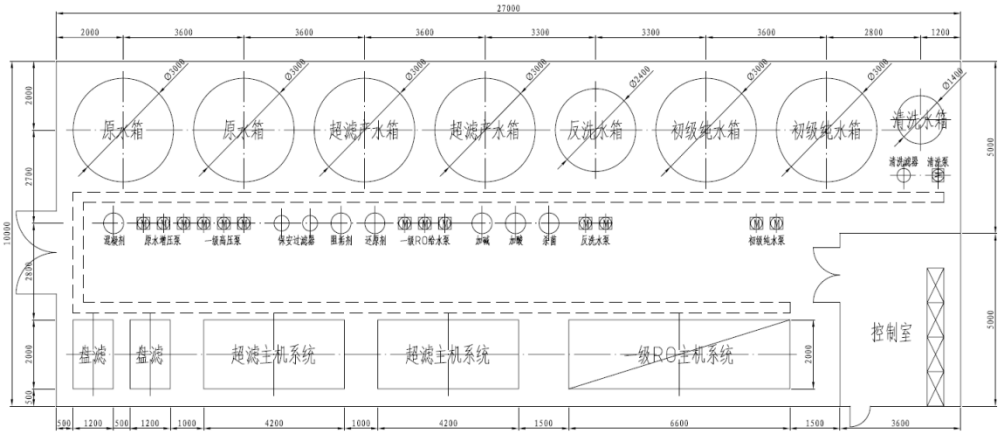


图 4-8 地面产水系统示意图

如图 4-8 所示，水源首先从盘滤开始，滤掉水里面泥沙等不容性固体大颗粒物质，进入原水箱，然后经过超滤主机，过滤掉不溶性小颗粒物质，进入超滤水箱，最后再经过一级 RO 系统，去掉水中大部分离子，产生初级纯水，进入初级纯水箱。在经过 RO 系统过程中，大约会有三分之一的废水产生。即大约有 40 吨/小时的废水产生，这部分水尽管含离子浓度较高，但对环境没有任何危害，可以直接排走。

4.2.2.2 地下产水部分

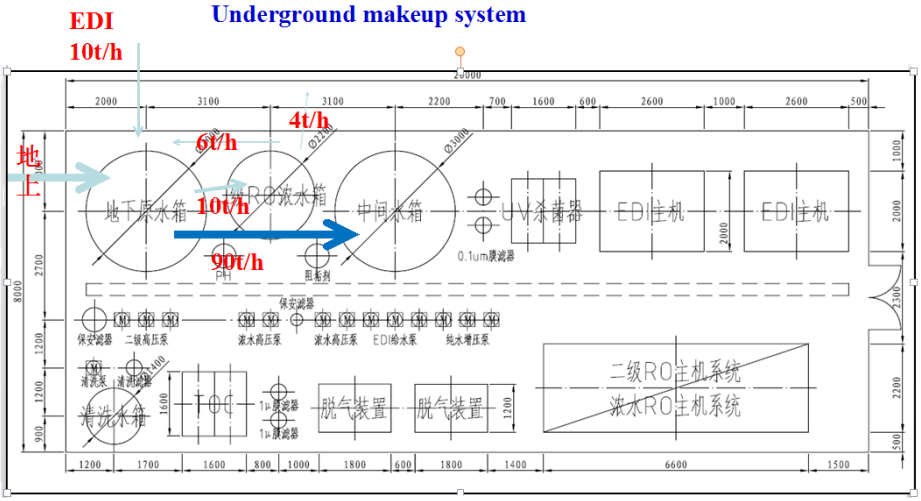


图 4-9 地下产水系统示意图

从地面初级纯水箱，约 85 吨/小时的纯水沿着 500 多米高度落差的密封管道进入地下原水箱，同时也会有大约 10 吨/小时 EDI 浓水和 6 吨/小时的地下浓水 RO 系统压缩后的水，总计约 101 吨/小时进水进入地下原水箱，这些水经过二级 RO 后，有 90 吨/小时进入中间水箱，10 吨/小时进入 RO 浓水箱，RO 浓水箱的水经过浓水 RO 系统，4 吨真正的废水排掉，6 吨/小时返回地下原水箱。90 吨/小时的中间水箱的水经过过滤器，TOC 紫外杀菌后进入 EDI 系统，水质在这一系统大大提升，产生 80 吨/小时电阻率将大于 16M 的超纯水供实验使用，10 吨/小时浓水返回到地下原水箱等待再次提纯。

4.2.2.3 地下循环净化部分

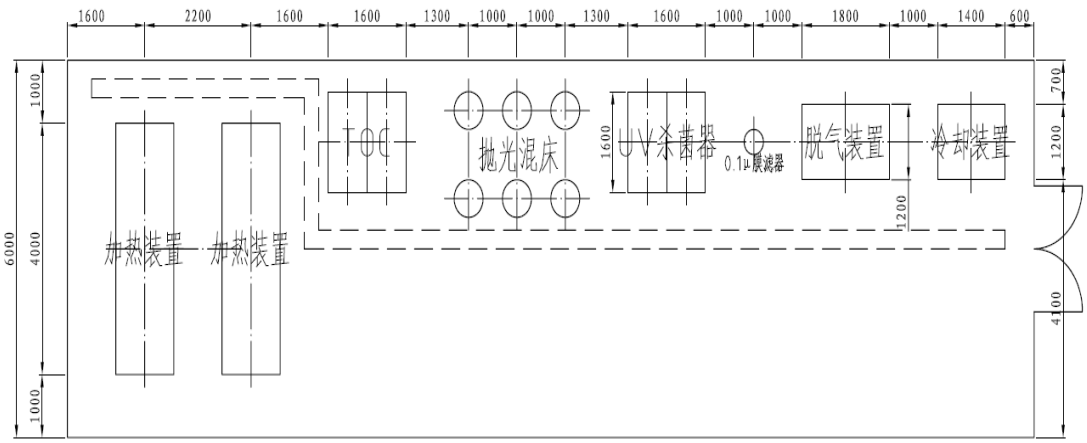


图 4-10 地下循环净化部分

当整个水池灌满超纯水，需要提纯净化时，泵体启动，从水池里抽出小部分水，大约 80 吨/小时，这些水首先经过加热装置，如水温过低，可加热到需要达到的温度，然后经过 TOC，

去除水中有机碳，再经过抛光混床，去掉水中的离子，提升水质，再经过紫外杀菌，过滤器，进入脱气装置，去除水中氧气等各种气体，最后经过冷却装置，最终精确控制水温想要达到的温度，进入水池。

包括产水、循环的整个水净化循环系统，将采用西门子 PLC 数据获取系统，实现全自动运行。实现 24 小时无人值守，值班人员只需要定期更换滤芯等耗材。

4.2.3 顶部径迹探测器

顶部径迹探测器现有三种方案：一种是基于 OPERA 的塑料闪烁体来设计的方案,作为主要探测器的设计方案；另一种液闪加光纤的径迹探测器方案；第三种是多层的 RPC 探测器方案,后面两种探测器设计方案作为备选方案。下面将详细介绍三种方案。

4.2.3.1 OPERA 的塑料闪烁体探测器

OPERA 为一个长基线中微子实验,实验用大量的塑料闪烁体来做为径迹探测器,OPERA 实验到 2015-2016 年左右实验结束,其合作组有意加入江门实验并可能提供其实验中的塑料闪烁体作为江门实验的顶部径迹探测器使用。如图 4-11，图 4-12 所示为 OPERA 的闪烁体组成的径迹探测器和探测器闪烁体的布局。每一个读出条的尺寸为 6.86 米长，厚度 10.6mm，宽度为 2.63cm，有光纤进行读出，每 64 路由一个多阳极 PMT 进行读出，每一个模块的面积为 6.7 *6.7 平米，整个探测器一共有 31744 个闪烁体条，一共 63488 路电子学读出。总面积为 2783 平米(每平米包括了 2 层读出 X 读出和 Y 读出)。图 4-13 所示为闪烁体读出与 PMT 的耦合示意图。

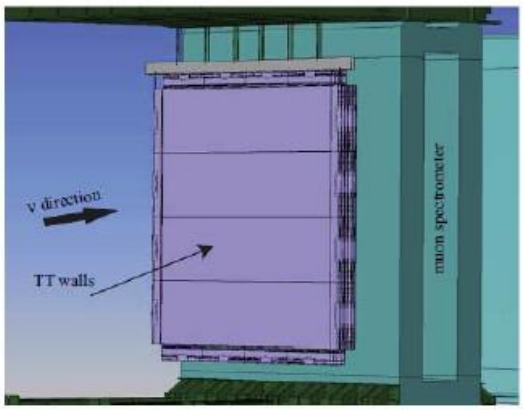


图 4-11 OPERA 径迹探测器示意图

图 4-14 所示为闪烁体观测到的光电子数与粒子入射位置距离闪烁体两端的距离的关系，中间位置入射时，两端收到最少，两端加起来总的光电子数目为 16 个左右。基于此对探测器的性能进行模拟，图 4-15 所示为模拟数据看到的 muon 事例的在闪烁体中观测到的光电子数和放射性事例观测到的光电子数。由于闪烁体探测器厚度比较薄，因此 muon 事例和放射性事例的能谱不能很好的区分开，放射性事例非常高，将给探测器带来比较大的影响。由此我们需要考虑如何使用 OPERA 的闪烁体，需要进行优化和设计，包括闪烁体使用的层数，使用面积，在空间的布局，探测效率，本底的考虑等等，以便更好的应用于江门实

验。

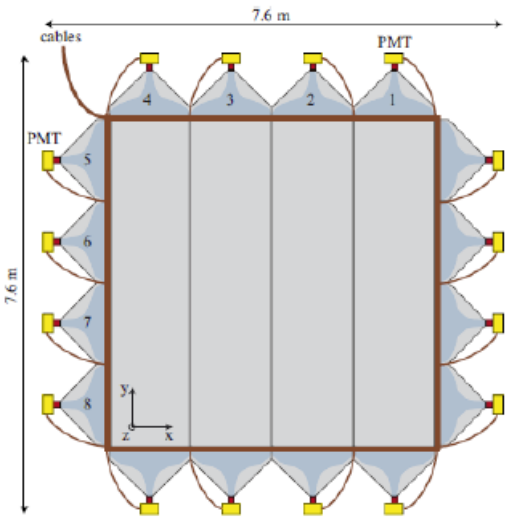


图 4-12 OPERA 闪烁体的布局，X-Y 读出

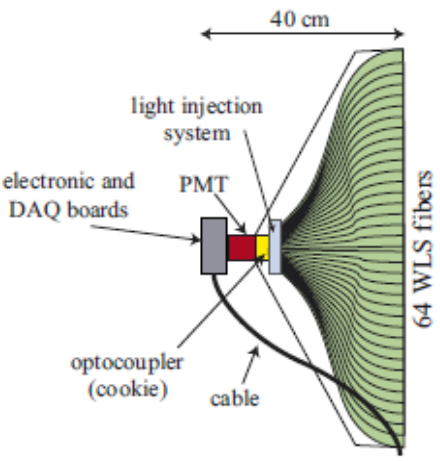


图 4-13 闪烁体与 PMT 的耦合情况

通过模拟对探测器的方案进行设计，首先考虑单层放射性事例率引起的本底，放射性事例和 muon 事例的能谱如图 4-15 所示，由此我们对能谱设置不同的阈值以及不同层数的耦合来研究噪声和效率的变化情况。如表 1 所示，单层闪烁体在阈值增大时，效率降低，噪声降低，当阈值到 12 个光电子时，效率从 99.3%降低到了 93%。由此我们将阈值设置在 8 左右，既可以降低噪声，且效率并没有明显降低。双层闪烁体情况下，由放射性事例同时双层过阈值的事例率很低<0.0025Hz/m^2,因此双层出现的噪声事例随机符合引入的为 388Hz/平米，因此双层出现的噪声事例基本上都是由于随机符合带来的(计算中使用随机符合使用的符合门宽为 300ns)。

表 1. 不同层数不同阈值下闪烁体的噪声和效率值(模拟结果)

p.e. Cut	>4p.e.		>6p.e.		>8 p.e.		>12 p.e.	
	Noise rate	Muon Effi.	Noise rate	Muon Effi.	Noise rate	MuonEffi.	Noise rate	MuonEffi.
1 layer	1.2e4	99.96%	5240	99.6%	3.8e3	99.3%	760	93%
2 layer(correlated event rate)	0.003	————	<0.0025	————	<0.0025	————	————	————
2 layer	3.8e3	99.86%	739	99.27%	388	97.00%	1.5	80.7%

对于探测器的方案设计，我们从最简单的 2 个超层考虑，每层有 X-Y 双层读出，两个大
层之间的间隔为 3 米；　可以铺 1390 平米，同时能够因此 2 个超层着火的随机事例率,噪声水平通过计算得到 125 Hz/m^2；　噪声水平比 muon 事例率(0.003Hz/m^2)还是要高很多，由此我们需要考虑更多的层数,实验采用 3 个超层时,每层平铺 928 平米,每层间隔 1.5 米，得到的结果为 1.4e-4Hz/m^2，　可以达到比 muon 事例率低一个量级。由于需要考虑实验实际运行中如果出现有一层有问题的情况，那么冗余度就不够。由此我们考虑 4 个超层的情况，对 4 个超层情况，四超层有 2 种摆放方式，一种摆放方式为 4 个超层中每一个超层和其他超层都间距 1.5 米，总高 4.5 米，如图 4-16 所示；另外一种摆放方式为 2 个超层为一组，分为 2 组，2 组之间的距离为 3 米，如图 4-17 所示，面积可以平铺 628.5 平米。前一种摆放方式，噪声水平 0.6Hz/平米，通过 muon 径迹重建和，第三层以及第四层的准确定位，假设定位精度为按照 0.1*0.1 米，噪声事例率可以降低至 1.5e-10Hz;后一种摆放方式噪声为 8e-13Hz/平米，两种方式的噪声都远远低于 muon 的事例率，将来实验中如果有一层出现问题，噪声水平依然可达到实验要求。

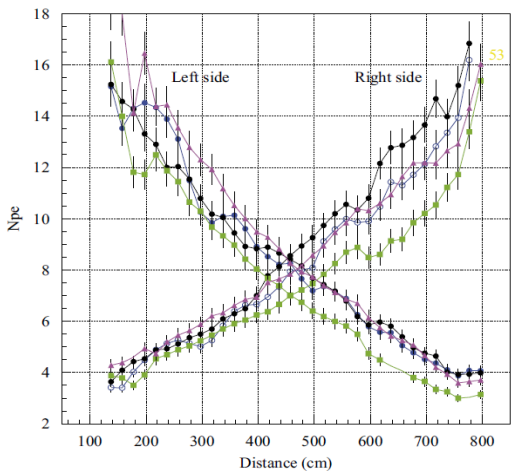


图 4-14 闪烁体测量到的光电子数入射距离的关系

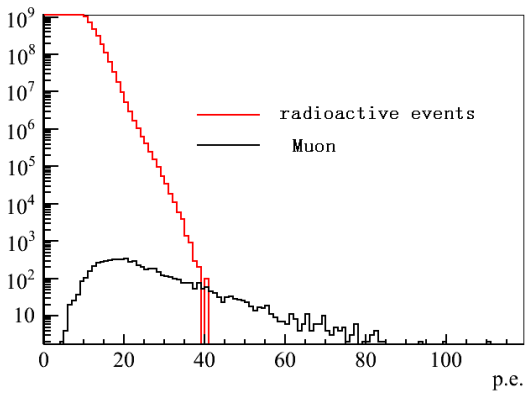


图 4-15 muon 事例和放射性事例的能谱和事例率

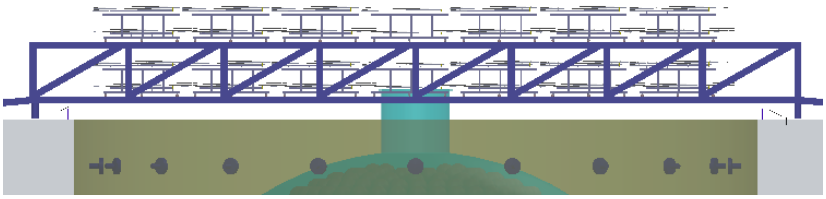


图 4-16 四个超层方案示意图(不同层摆放等间距 1.5 米，总高度 4.5 米)

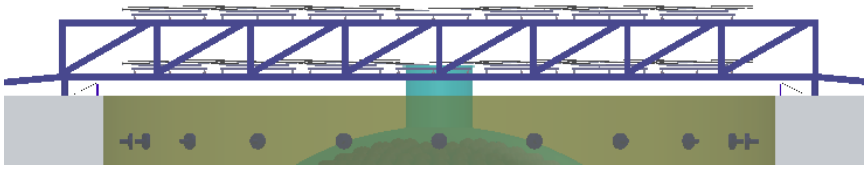


图 4-17 四个超层方案示意图(2 个超层为一组，两组之间为 3 米)

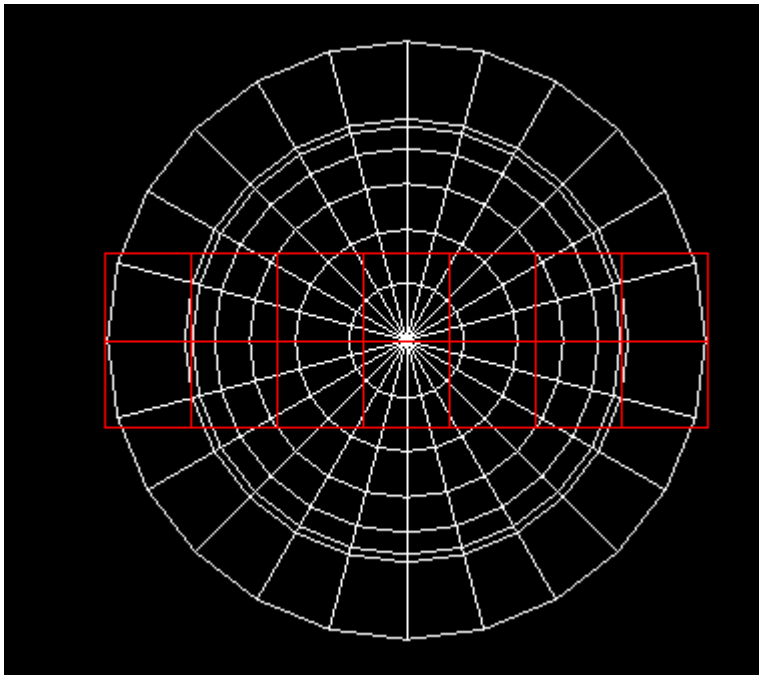


图 4-18 OPERA 模块在探测器顶部的摆放方式

通过初步研究确定使用 4 个超层来压低放射性本底，我们还需要研究具体的摆放方式，来使顶部探测器更多的探测到宇宙线引入的本底，Li9/He8 和快中子本底。通过模拟研究了 3 中主要的可行的摆放方式，长条性摆放（图 4-18 红线所示），正方形摆放和“O”字行摆放方式。表 2 所示为最终的结果，“回”字形摆放方式探测到的 Li9/He8 最少，正方形最多。我们考虑到长条形可以测量岩石中子本底，而探测到的 Li9/He8 和正方形差别不大，因此确定长条行摆放对实验最有利。

9Li/8He	AD	AD by topD selected	WP by topD selected	B/S
OPERA(4XY,Square)	90/day	27/day	0.35/day	0.9%
OPERA(4XY, Rectangle)		23/day	0.30/day	0.7%
OPERA(4XY, “O”)		9/day	0.16/day	0.4%

表 2 OPERA 在顶部不同摆放方式对 Li9/He8 的探测能力

由此我们通过对 OPERA 设计方案的模拟计算的初步研究，认为使用 4 个超层，平铺 628.5 平米长条行的摆放方式，可以作为江门实验顶部径迹探测器的初步设计的方案。

4.2.3.2 液体闪烁体加光纤探测器

液体闪烁体加光纤方案为顶部径迹反符合探测器的一个候选者。目前国际上 NOvA 实验正在使用此类探测器，实验正在安装（1. Physics Procedia 37 (2012) 1201 – 1208， 2. NOvA Technical Design Report, Oct 8, 2007)，MINOS 实验也曾将其作为一个备选方案进行了详细研究（NIM A463 (2001) 194－204)。此方案若被江门中微子实验采取，将是第一个把次探测器用在地下低本底实验上，对后续的低本底实验的反符合探测器的研究将有重要意义。

探测器原理如图 4-19 所示。液闪盛进光密封的 PVC 盒子中，波长位移光纤浸泡其中，从两端引出。宇宙线粒子穿过液闪，液闪发光，光直接或经过壁的多次反射进入波长位移光纤，然后向两端传输到收集光信号的光电倍增管（PMT)。

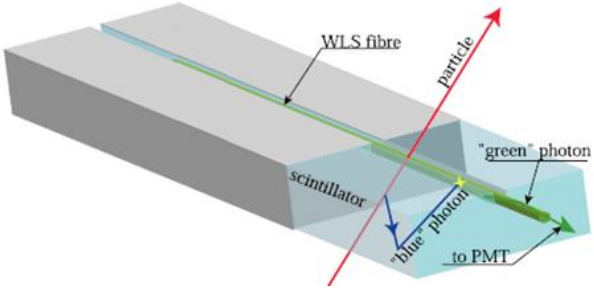


图 4-19 液体闪烁体的结构图

每层的厚度要求 4cm 左右，宇宙线穿过 4cm 的闪烁体大概有 6MeV 的能量沉积，而大部分放射性事例能量都在 3MeV 以下，因此相对比较厚的液体闪烁体能够有效的区分宇宙线事例和周围环境产生的本底。我们对此做了模拟，如图 4-20 所示，可以看到绝大部分的放射性事例光电子数都在 15 以下，而 muon 事例大部分都分布在光电子数相对较多的区域。探测器对宇宙线的探测效率可达 98%以上。由于液体闪烁体价格便宜，根据需求可以方便的选择较厚的液体，一方面可以提高光产额，更为重要的是可以压低岩石放射性本底。探测器形状设计，使用一次成型的复排结构 PVC，降低死区。上下两排 PVC 进行 XY 二维读出，组成一个超层，可定位宇宙线击中位置。两个超层上下距离一定位置即可定位宇宙线的方向。

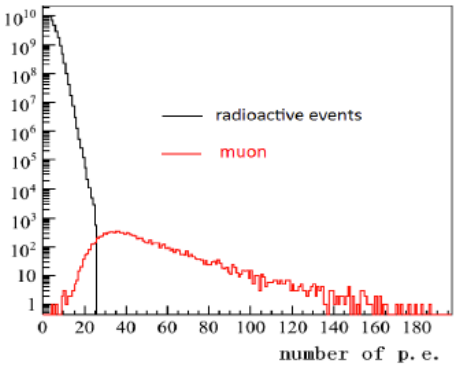


图 4-20 放射性事例和 muon 事例探测到光电子数的分布（模拟结果）

此方案使用液体闪烁体加光纤探测器来标记宇宙线本底，与具有相同功能的其他类型探测器（塑料闪烁体，RPC）相比具有一定优势。首先是造价低。使用价格便宜的 PVC 塑料作为容器，液闪在大亚湾中微子实验已经成功应用，其配制技术已经成熟，而且江门中微子实验的中心探测器部分也使用液闪，顶部探测器只使用部分液闪即可，造价便宜。光纤使用量较少也不贵，总体造价比塑料闪烁体低几倍。其次是探测器稳定性好，液闪在大亚湾中微子实验的稳定运行是稳定性较好的证明。再次是后续维护方便。不需要后续供气，基本没有后续消耗，也能节省运行开支；预留进出液口，排掉和灌装液闪方便，不用移动探测器即可操作。最后是偶然符合和放射性本底可以大大降低。闪烁体加光纤方案，由于液闪造价低，可以大量使用液闪，做成多层符合使用，能够大大降低偶尔符合和放射性本底的影响，在深地实验室有比较大的优势。液闪加光纤探测器结合了塑料闪烁体和 RPC 探测器的优点，具有独特的优势。

4.2.3.3 RPC 探测器

RPC 是近几十年来发展起来的气体探测器，具有探测效率高，性能均匀及价格低廉等优点，特别适合大面积制作，不受天然放射性影响，因此广泛的在高能物理实验中使用。高能物理所拥有成熟的大批量生产 RPC 的技术，制作的大量 RPC 已经应用于 BESIII 探测器。一个 RPC 由两层阻性板组成，中间是一层细小的气体室，其结构如图 4-21 所示。两块阻性板上加高压以在气体中产生强电场。当宇宙线穿过气体时会发生电磁雪崩或流光，产生的带电离子飘移到信号条上形成信号送往数据获取系统。

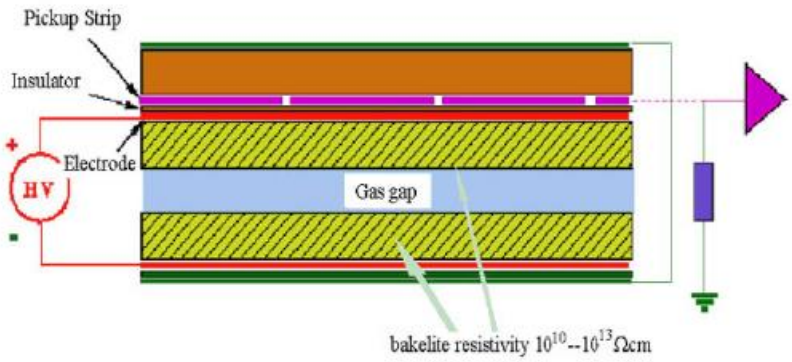


图 4-21 RPC 结构示意图。

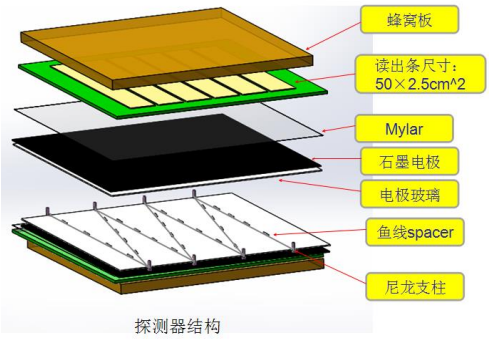


图 4-22 玻璃 RPC 的模型

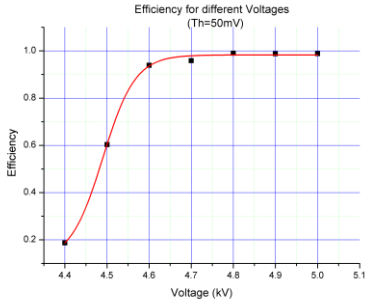


图 4-23 RPC 的效率随高压的关系

RPC 在大亚湾地下实验使用中发现 RPC 在高湿度环境下的稳定性以及噪音大的问题，对数据的分析有比较重要的影响。江门实验由于探测器放置更深，宇宙线通量更小，由噪音偶然符合带来的影响将更大，因此希望在对未来使用 RPC 时,最好能够通过工艺或者增加层数来改进 RPC 性能，将噪声降低。另外一种方案，就是使用玻璃 RPC，玻璃表面光滑平整噪音小，且玻璃是工业上应用广泛的产品，适合大批量的生产。在玻璃 RPC（GRPC）的模式下，有自密封 GRPC 和盒子密封 GRPC。自密封 GRPC 是传统 RPC 制作技术，但胶木板由玻璃代替，盒子密封的 RPC 技术是来源自 MRPC 技术，如图 4-22 所示为盒子密封 GRPC 的模型结构图。图 4-23 为玻璃 RPC 初步测量的效率随高压变化情况。目前存在的玻璃 RPC 尺寸在 1 平米左右，为减少死区，一是研发更大尺寸的玻璃 RPC，另外是可以对相互摆放位置做仔细研究。

针对地下实验的大面积自密封 GRPC，其研制关键点如下:1- 大面积 GRPC 气体流动均匀性问题；

2- 应用在地下实验电极覆膜的工艺研究；3- 大面积 GRPC 防止水蒸气随着气体进入的工艺设计问题；4-大面积 GRPC 方便运输及保护的框架设计。30cm*30cm 尺寸的自密封 GRPC 已经研制成功，如图 4-24 所示，1.25m*1.25m 尺寸的 GRPC 正在研制中并将送到大亚湾中进行测试。

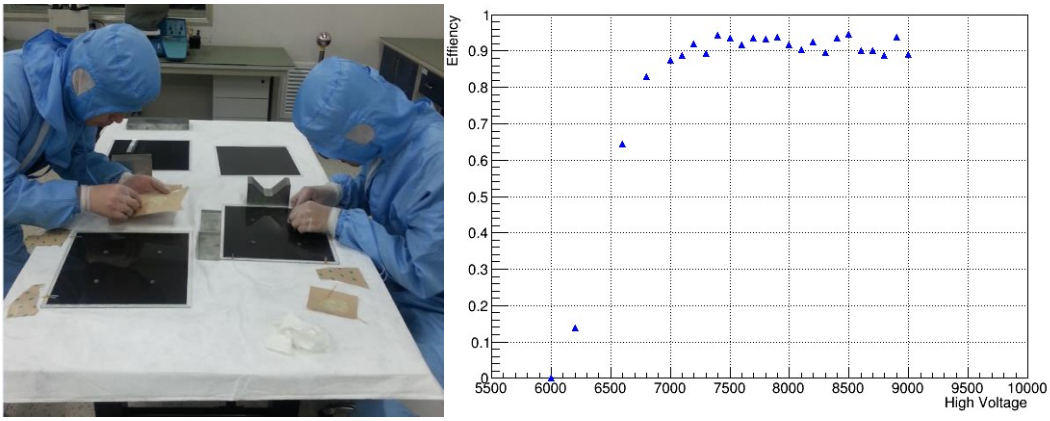


图 4-24 自密封 GRPC prototype 研制

不管采用何种 RPC 技术，在探测器模块的设计上，要把层效率刻度的精度和长期可靠性放在更加重要的位置。另外需要对 RPC 探测器的长期工作在地下实验的稳定性进行测试，以及在高放射性的情况下本底的测试。

4.2.4 地磁屏蔽系统

在实验地点附近的地磁场在水平方向的分量约为 40uT,高斯,竖直分量约为 24uT ,我们将在水池的外围设计线圈对地磁场进行屏蔽,使得剩余地磁场减小到 10 uT 以下，使光电倍增管的性能基本上不受地磁场的影响。由于江门实验将使用 20 英寸的光电倍增管作为中心探测器的主要探测器器件，光电倍增管的尺寸大受到地磁场的影响大，从而降低探测器的整体性能。如图 4-25 所示，为模拟磁场大小对实验的影响。江门实验又是一个高精度的实验,因此需要对整个大探测器进行地磁屏蔽，建立一个有效的地磁屏蔽系统，以确保探测器的性能。

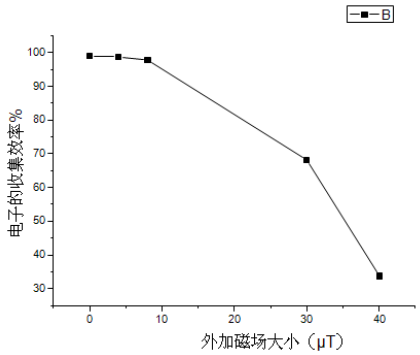


图 4-25 模拟磁场强度对 PMT 的收集效率的关系

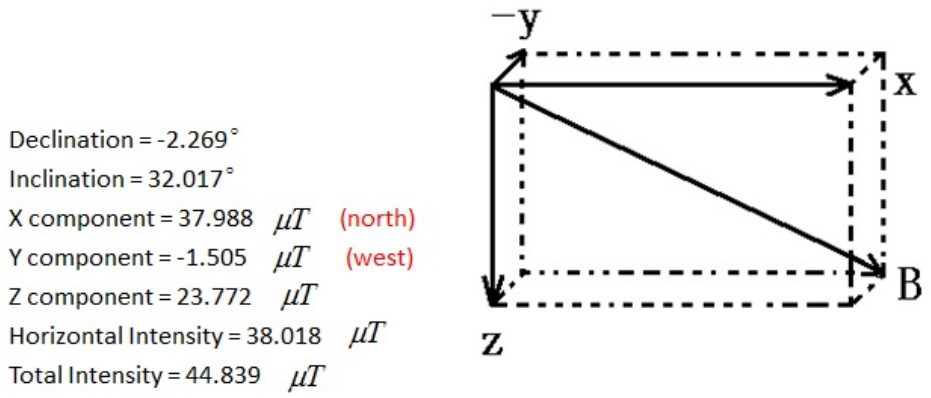


图 4-26 江门附近的地磁场

我们设计对水平磁场和竖直磁场进行分别的补偿，对于竖直地磁场屏蔽，由于大亚湾二期整体是一个竖直向下的圆柱体结构，为了保证中心直径为 37.5m 球内的地磁场被很好的屏蔽掉，而且又是在直径和轴向高都是 40m 的圆柱体内，因此设想在圆柱体轴向外表面布置多个螺线管线圈来补偿地磁的竖直磁场。 竖直磁场屏蔽线圈根据可用圆柱体外径及轴向两端端面，暂时计算将其布置在圆柱体外半径为 20m 的圆柱面上，共需要 16 对线圈。

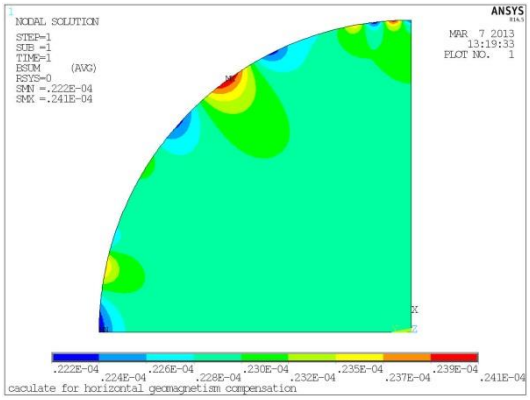


图 4-27 直径 37.6m 球内磁场分布

中心点磁场 Bo=2.3e-5T；中心区 37.6m 球内磁场最大最小值不均匀度为：8.5%。图 4-27 为球内的磁场分布。

对于水平磁场的屏蔽，使用 10 对线圈，图中显示的是一半 5 对，另一半和这个对称。线圈的间距大概为 4 米； 线圈根据探测器的形状，水平方向的尺寸进行响应的变化。水平方向补偿线圈，通过初步的优化，使用 10 个线圈初步计算,剩磁<10uT,进一步的优化还在进行中。

地磁的方向包括了水平和垂直方向，线圈的屏蔽也包括了垂直和水平线圈，垂直的线圈顶部位于水池桶部上方，如果地磁屏蔽线圈的安装在物理探测器安装之前，线圈的安放将影响桶内物理探测器的安装。这可以通过在线圈上加装插母来解决。当安装探测器时，将插母拨开（图中放大的部分），方便探测器的安装，当探测器安装完成后，再将插母连接上。图如下图 4-28 所示。

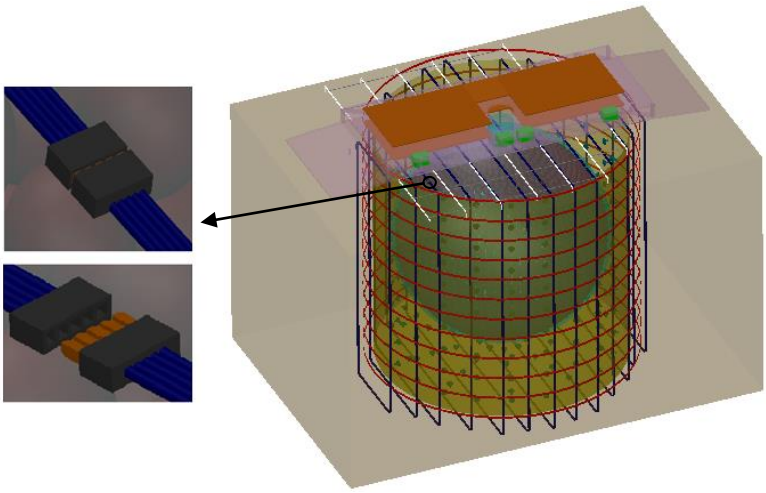


图 4-28 地磁屏蔽系统示意图

4.2.5 机械及安装

4.2.5.1 顶部的支撑结构

顶部径迹探测器主要分为两组，每组有若干层径迹探测器叠放在一起，低的一组安放在钢架桥上，而高的一组需要安放在第一组上方 3 米的地方，因此可能需要将桥做成两层，如图 4-29 所示。双层桥的具体参数为：桥宽 17m-20m，两层桥面间距为 3m；顶部支撑钢结构主要的功能有三个方面：(1)顶部 veto 径迹探测器的支撑；(2)中心探测器刻度系统的支持；（3）电子学间是否位于顶部支撑结构上尚不确定。顶部径迹探测器位于水池上方，水池直径 42 米，桥宽 17-20 米，由于桥的跨度大于 42 米，中间不设支撑，考虑到地下空间高度的限制和保证刚度的考虑，桥为厢式结构，类似于吊车的厢式结构，桥的宽度可以放置两列 OPERA 闪烁体，宽度为 15 米，再考虑未来的人员通道和 3m 的电子学间宽度，因此桥面有效的使用通道为 17~20 米。载荷为中心探测器电缆及其电子学间重量（约重 100 吨），以及径迹探测器（约 70 吨）及其支撑结构和电子学间重量（约 20 吨）。

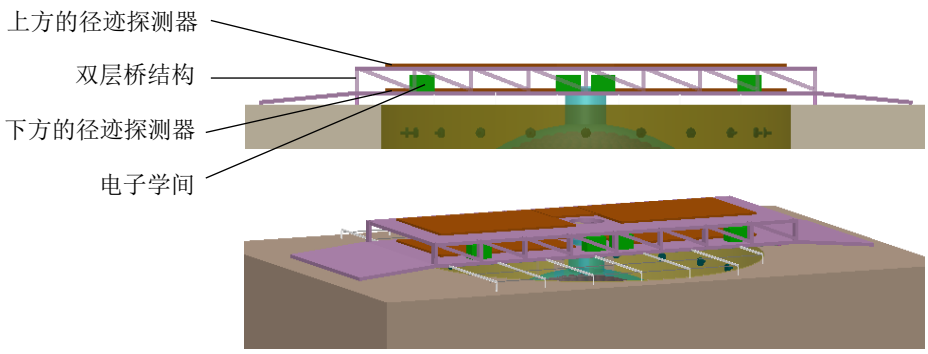


图 4-29 顶部双层桥支撑结构

4.2.5.2 PMT 的支撑结构

PMT 的支撑结构可以借用大亚湾实验的固定方式，如图 4-30 所示，通过将 PMT 固定于支架上，再将支架固定在水池内的结构上。水池内机械结构将与主探测器的选择和设计相关。PMT 的支撑结构设计同时要考虑 Tyvek 反射膜的固定将一并考虑。

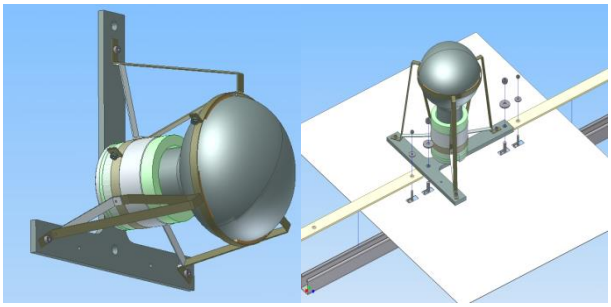
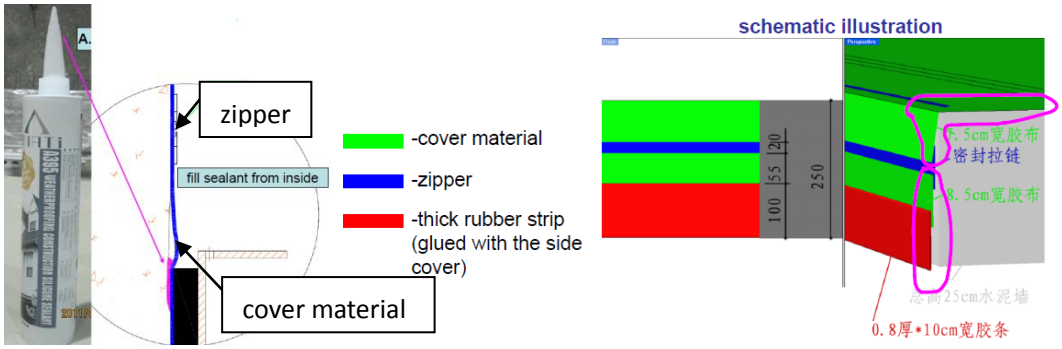


图 4-30 大亚湾实验 PMT 固定支架及其安装

4.2.5.3 水池顶部的密封结构

大亚湾实验使用黑色橡胶布作为水池密封盖，密缝布与水池边缘通过气密拉链连接，如图 4-31 所示。实验达到了气密和光密封的效果，密封拉链的使用可以方便地对水池内的部件进行更新和维护，如纯净水系统的液位计的更换。对于江门实验，仍采用成熟的一期方案。

a)



b) 密缝布与水池边缘的密封连接示意图

图 4-31 大亚湾实验水池密封示意图：a）气密拉链；b）密缝布与水池边缘的密封连接示意图

但是由于探测器体积非常大，跨度大，达到 40 米的跨度，因此水池密封布的安装难度增大，作为候选的安装方案有大亚湾实验的钢索方案和新提出的导轨方案。两种安装方案相似，只是钢索方案，布沿着钢索滑展开，如图 4-32 所示，而导轨方案，布沿着导轨展开，如图 4-33 所示。相比较而言，钢索方案现场安装更繁琐麻烦，由于钢索的刚度小，密封布展开过程中会耷拉到地面上，与地面接触摩擦，因此有一个调节钢索支柱高度的过程。具体流程如图 4-32 所示，首先将密封布和和滑轮摆放到位，钢索架设在较高的支柱上，通过缠绳器拉紧到合适预紧力；其次将密封布展开，完成密封布的密封和固定工作，并将较矮的支柱安装到位；最后，通过钢丝绳高度调节装置慢慢地将钢丝绳下放到合适的高度。

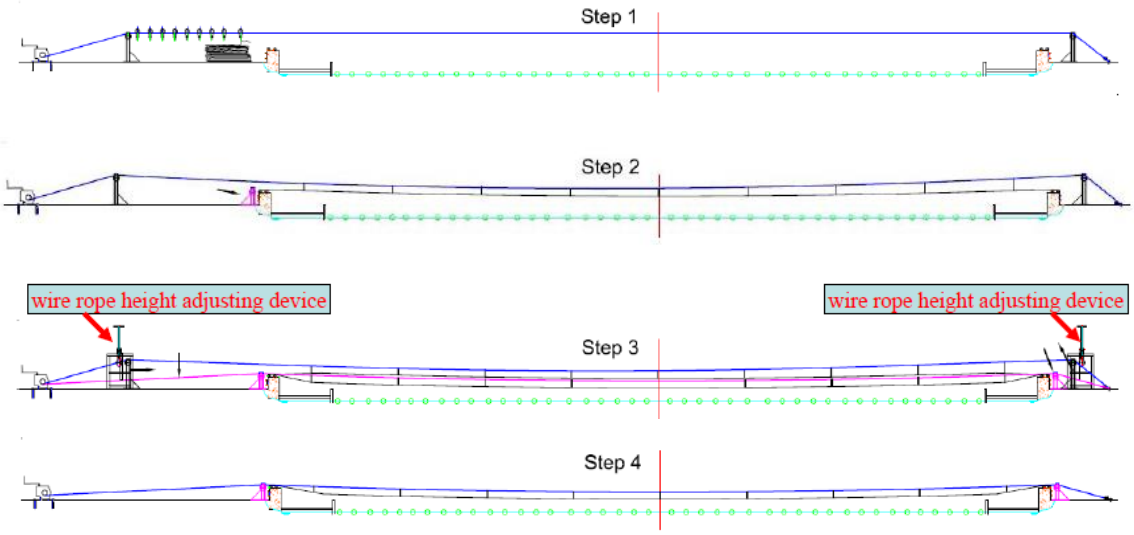


图 4-32 大亚湾实验橡胶布钢索安装方案及步骤

而导轨方案，费用略高，但是现场安装简易安全。导轨方案主要包括主梁、支柱、导轨和滑轮。若干条导轨，安装于桥下方，通过主梁支撑固定，主梁一端支撑在桥上，一端通过支柱将载荷传递给地面。

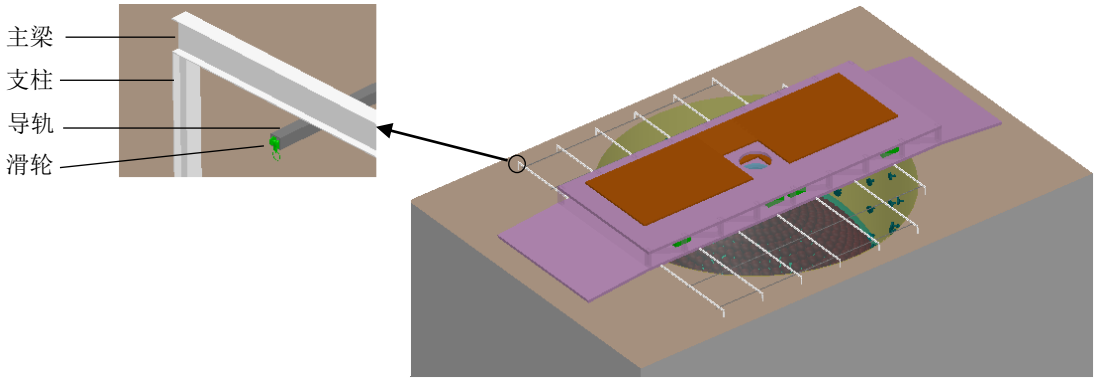


图 4-33 橡胶布导轨安装方案

两种方案各有优缺点，最终的设计方案仍在讨论中。

4.2.5.4 水池内衬和保温

反符合探测器实验厅的水池尺寸为圆柱型，尺寸为 40 米尺度，超纯水用量约 23000 吨。由于实验处于 700 米深的地下，岩石周围的水压高，水契仑柯夫探测器需要考虑做高质量的内衬，防止探测器漏水（岩石内的水进入探测器），破坏了探测器的水质，导致探测器性能变差，实验采用不锈钢材料作为水池与岩石之间的内衬材料，不锈钢有较好的抗压性能，又不污染超纯水。施工可借鉴一版大型储水设置的常用方法，江门中微子实验这样的超大型水池内衬仍需进一步研究。

未来探测器系统的正常工作温度是 20 度，然而实验点附近岩石温度约 32 度左右,高于工作温度，考虑到水池周围是花岗岩，透水性差，具有一定的保温效果，同时水池外壁的混凝土热传导系数为：1.63W/m·K，是热的不良导体，通过独立的热传导计算和根据大亚湾实验水池温度，流量，入水出水温度差的计算的实例均表明，江门中微子实验的水池保温不一定要求另外的保温层。

4.2.5.5 探测器的安装

探测器安装包括光电倍增管的安装，光电倍增管支架的安装。由于探测器的尺寸为 40 米，因此在跨度和高度上具有比较大的难度。在安装方面，首先确定最简易的光电倍增管支架固定支撑方式，仍在考虑中。目前考虑将 PMT 及其支架固定到竖直的预紧钢索上，然后成串放置并固定，相关方案尚待相关专家评议。其次，安装中，需要考虑特种作业工具和作业管理，来确保安装人员的安全以及安装的顺利进行。

4.3 探测器模型研制和计划

2013 -2014 年，关于液闪+光纤模型，进行的探测器模型的建造准备工作，进行探测器的建造，建立起来基于液闪+光纤读出的模型探测器系统，能够开始数据获取工作；关于多层阻性板探测器，开始阻性板探测器测试系统建立的准备工作；建立起基于多层阻性板探测器（RPC）的模型探测器系统，能够开始数据获取工作； 关于 OPERA 探测器退役后的塑料闪烁体用于江门实验顶部探测器可行性的研究，进行模拟计算和探测器方案的设计。

2015，基于不同种类的探测器进行性能的测试对比，完成最后顶部探测器方案的确定。关于模型探测器的研究，主要有以下三个模型相关的研究。

4.3.1 液闪+光纤探测器

对于液闪+光纤的方案，首先需要研究材料的兼容性，PVC 材料跟液闪的兼容性和材料本身的反射率对液闪加光纤探测器探测器影响较大。材料不兼容会降低液闪的性能，反射率不高会降低光收集。所以 PVC 的选材要做到既能跟液闪兼容又能反射率较高。通常 PVC 为混合物，主要成分是聚氯乙烯、少量二氧化钛（TiO_2，俗称钛白粉）和添加剂。聚氯乙烯化学分子上属于极性物质，液闪主要是直链烷基苯，属于非极性物质，二者不相互溶解，是兼容的，但是其他保证 PVC 性能的少量添加剂不能保证都是兼容的，所以在尽可能保证 PVC 性能条件下，尽量少加添加剂，

还需要多加钛白粉以增加反射率。经过与厂家反复研究，选取了一种型号为 R1071 的 PVC 配方，其中钛白粉为锐钛型，含量为 30 份。图 4-34 是不同型号的 PVC 反射率对比图。R1071 号 PVC 反射率具有上升波长早、反射率高的优势。

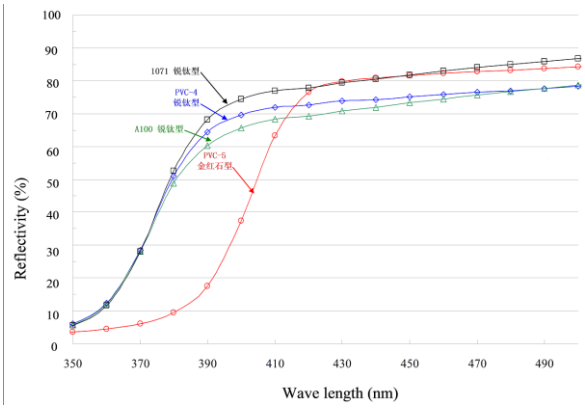


图 4-34 不同配方的 PVC 反射率对比图。

确定了使用材料后，通过搭建模型探测器，对影响探测器性能的各种影响进行研究，包括材料的反射率，液闪厚度，光纤密度，探测效率，噪声等方面进行研究，以确定最后所使用的设计方案。

关于探测器形状设计，使用一次成型的复排结构 PVC，降低死区。上下两排 PVC 进行 XY 二维读出，组成一个超层，可定位宇宙线击中位置。两个超层上下距离一定位置即可定位宇宙线的方向。

图 4-35 复排结构的 PVC（NOvA Technical Design Report, Oct 8, 2007）。

具体设计如下：每一个 PVC 格子读出宽度为 25cm，长度为 4 米，可以满足实验对定位精度的要求，其中每个格子单元有 8 根 1.5mm 直径光纤（BCF-92 系列）均匀分布其中，在双端与多阳极的光电倍增管（R8900 4 阳极或者 16 阳极）耦合。16 个 PVC 格子组成一个单元，宽 4m，两个单元交叉叠放，组成一个 4m*4m 的超层。上下超层之间的间隔 3 米，可以保证有较好的位置和方向分辨，位置分辨 ~0.1m, 方向分辨 ~2 度。

4.3.2 RPC 探测器

对于 RPC 探测器的研制，主要从两个方面进行主要研究，一方面就是对大亚湾一期采用的 Bakelite RPC 进行优化设计，提升性能，包括多层设计和降低噪音的研究；另一方面就是关于对玻璃 RPC 的研究，大面积使用玻璃 RPC 的相关研究。

大亚湾中微子实验是世界上首次使用 RPC 构成其地下宇宙线反符合系统的实验，其运行给

更深地下的 RPC 宇宙线反符合探测器系统提供了经验。在后面的研究及探测器设计中，我们需考虑下面问题进行改进：

1）层效率的刻度问题:

从大亚湾实验来看，当宇宙线事例率低时，RPC 单层效率的刻度刻度误差变大，不利于物理精确分析。以江门中微子实验为例，其岩石覆盖厚度比大亚湾中微子实验深度更厚，宇宙线通量也会更低。那么，上述效率刻度问题应该更加引起重视。

2）RPC 在长期在潮湿环境下的运行问题:

大亚湾中微子实验处于我国南方，常年湿度很高，而实验厅容积很大，湿度控制难度很大。RPC 长期运行在高湿度环境下，漏电流很大，可能会造成将来严重的老化问题。我国目前的地下实验室（中微子物理研究的大亚湾中微子实验和江门中微子实验、暗物质探测的锦屏地下实验室）都处于我们南部，都存在环境湿度高的问题。所以 RPC 长期在潮湿环境运行的问题也需要重视。

3) RPC 探测器长期运行的可靠性问题

大面积、多模块多层的使用探测器，难免会有某一层在长期的运行中会出现问题。我们需要在设计中有冗余度，对出现某一层不工作的情况下的探测器性能及运行要有估计。

综上所述，在把 RPC 应用到江门中微子实验的前期研究中，我们拟通过下列研究内容来实现：

1） 结合江门中微子实验大厅的宇宙线通量，在模块设计上通过多层设计，提高模块探测效率、信噪比及减小层效率刻度误差。考虑模块边缘死区及模块间缝隙情形，通过模块布局方式优化，实现极高的 RPC 系统探测效率。

2) 给出故障（某一层或几层 RPC 坏了）情况下，RPC 系统效率的变化规律，并根据以前 RPC 运行的故障出现概率，给出长期运行情况下的探测效率可能的变化，以此来优化模块设计。

3）减小 RPC 的噪声率和在高湿度环境下的漏电流。

4.3.3 地磁屏蔽系统

地磁屏蔽系统的研究，通过数值计算，我们研究了相关补偿线圈与均匀度的问题，由于实际实验中有建筑钢筋混凝土，以及支撑不锈钢材料的存在，将影响屏蔽补偿系统磁场的分布，这将影响最终的补偿效果。因此计划建立一个小的磁线圈系统，来研究实验所使用钢材料的影响，由实验结果对使用钢材料对未来地磁补偿系统的影响做出准确地估计，依此来设计最终的地磁屏蔽系统。

4.4 探测器生产制造和运输

反符合探测器主要分为水契伦科夫探测器和顶部的径迹探测器，其中对于水契伦科夫探测器，最主要的是光电倍增管的测试，运输，以及水循环净化系统制造和运输，以及支撑结构的制造和运输，光电倍增管的测试和运输将和中心探测器一起进行，水循环净化系统和支撑结构的制造和运输，需要确定最终设计方案，然后进行相关的招投标，进行相关设备和器件制作和生产。顶部径迹探测器需要等到研究方案最终确定下来，然后确定相关的制造和运输的流程。

4.5 实验风险和安全问题

由于将来探测器的体积大，实验厅的空间相对小，实验的风险主要来自于探测器安装阶段各个探测器之间装配协调时间问题，如果装配协调不合理可能将会很大程度上影响整个反符合探测器的安装进度。对于此项风险，通过各个探测器之间的合理的协调，制定严格的时间表，可以避免此风险。如果一旦出现探测器安装时间冲突的问题，应该各个探测器相关负责人进行协商，尽快制定出合理的时间表，保证安装的顺利进行。

对于安全问题，应该主要是在探测器的安装阶段，高空作业和大尺度探测器的装配，需要严格执行探测器安装的相关安全流程，避免出现安全问题。

4.6 工作计划进度和预算开支

4.6.1 工作计划进度

2014 年

基本建立起来两种反符合系统的模型探测器，能够开始数据的测量工作：

1）建立起来基于液闪+光纤读出的模型探测器系统，能够开始数据获取工作；

2）建立起基于多层阻性板探测器（RPC）的模型探测器系统，能够开始数据获取工作；

2015 年

基于不同种类的探测器进行性能的测试对比，完成最后顶部探测器方案的确定：

1）基于液闪+光纤的模型探测器到大亚湾实验厅进行性能测试；

2）基于多层阻性板探测器模型在大亚湾实验厅进行性能测试；

3）OPERA 探测器退役后的塑料闪烁体用于江门实验顶部探测器可行性的研究。

2016 年

完成水池内衬方案的确定，开始内衬安装的准备工作；

完成水池保温层方案的设计，开始安装准备工作；

完成确定地磁屏蔽方案的设计，开始安装准备工作。

2017 年

开始水池保温层的安装工作；

开始水池内衬的安装工作；

开始地磁屏蔽的安装工作。

2018 年

完成水契仑柯夫探测器 PMT 支撑结构的生产和顶部径迹探测器的支撑结构的生产；开始水契仑柯夫探测器 PMT 的安装和顶部径迹探测器的安装。

2019 年

完成水契仑柯夫探测器安装和顶部径迹探测器的安装，开始超纯水的灌入。

2020 年

完成超纯水的灌入，开始水契仑柯夫探测器和顶部径迹探测器的调试和试运行。

4.6.2 预算和开支

年度	预算	开支	备注
2014 年度			
2015 年度			
2016 年度			
2017 年度			
2018 年度			
2019 年度			
2020 年度			
总结			

第5章 MCP-PMT 研制

章目录：

第 5 章 MCP-PMT 研制 86
5.1 Design goal and specifications 89
5.1.1 设計目标 89
5.1.2 PMT 设計指标 90
5.2 PMT Design (以及 options) 91
5.2.1 自主研制的动机 91
5.2.2 PMT 的自主研发的计划 91
5.2.3 大型高效率 PMT 自主研制現狀 93
5.3 Manufacture & assembly 96
5.3.1 大面积微通道板光电倍增管研发 96
5.3.2 研究工作基础 97
5.4 R&D results and plans 102
5.4.1 MCP-PMT 研究现状 102
5.4.2 商业大型高效率光电倍增管的现状 104
5.5 Risk analysis, safety, etc 106
5.5.1 PMT 的 QE 不高导致的风险 106
5.5.2 MCP 组件的寿命的风险 108
5.5.3 电倍增管本身放射性本底带来的风险 109

5.5.4 微通道板收集效率不均匀的风险 112
5.6 chedule & Cost 115
5.6.1 合作组研制、工程化和批量生产的计划： 115
5.6.2 2014 年度计划 115
5.6.3 费用 116

图目录：

图 **5-1.** 日本滨松公司提供的各类光阴极灵敏度和量子效率光谱响应曲线 92
图 **5-2.** 高能所提出的新型高效大面积 MCP-PMT 原理图。 92
图 **5-3**. MCP-PMT 电子光学模拟原理图 94
图 **5-4.** MCP 模拟原理图 94
图 **5-5.** 封装完成的 20 英寸玻壳在机械尺寸测量台上 95
图 **5-6.** 大面积微通道板光电倍增管研发路线图（空间） 96
图 **5-7.** 已经建成的 PMT 性能测试研究实验室 98
图 **5-8.** PMT 性能测试研究实验室可以测试 PMT 的各项参量 99
图 **5-9.** 西光所开发的 MCP-PMT 制备工艺流程图 100
图 **5-10.** 夜视集团开发的 MCP-PMT 制备设备 101
图 **5-11.** MCP-PMT8 吋样管 QE 测试和单光电子谱测试 102
图 **5-12.** MCP-PMT 20 吋样管玻壳 103
图 **5-13.** MCP-PMT 测试实验室设备图 104
图 **5-14.** 普通双碱阴极的辐射灵敏度、量子效率以及液闪的发射光谱 106
图 **5-15.** 各种量子效率曲线 107
图 **5-16.** MCP_PMT 光阴极增加增透膜示意图 107
图 **5-17.** MCP-PMT 阳极输出电荷量随时间的变化关系----老化 108
图 **5-18.** 20 吋 PMT 玻壳主体及其过渡节的几何尺寸及其要求 109
图 **5-19.** 球坐标系下，QE（R, θ，φ）均匀性 112
图 **5-20.** 通过聚焦电极优化探测效率均匀性 112
图 **5-21.** 如何优化单片 MCP 的实例 113
图 **5-22.** 如何优化 MCP 组件的实例 113

表目录：

表 **5-1** 江门中微子实验所需的 PMT 尺寸和数量 89
表 **5-2** 江门中微子实验的 PMT 技术参数 90
表 **5-3.** 现阶段主要研究进展 102
表 **5-4.** GG-17 玻璃主要成分表 110
表 **5-5.** 玻璃样品放射性低本底测试数据 110
表 **5-6.** 其他玻璃原料的低本底测试数据 111

5.1 Design goal and specifications

5.1.1 设計目标

光子探测器检测中微子和液体闪烁体反应发出的闪烁光，是实现江门中微子实验物理目标的关键。其基本要求是对闪烁光子探测效率高，增益高，性能稳定可靠，寿命长，成本低。江门中微子探测器使用 20000 吨液体闪烁体，按照中心探测器采用有机玻璃球和网架设计方案，探测闪烁光子的光电倍增管将位于 37.5 直径的球面上。该球面的总面积为 4654 平方米，光敏面积的覆盖率要求在 75%以上。因此大面积真空光电倍增管（PMT）是唯一现实的选择。如果采用 508 毫米（20 英寸）外徑的 PMT，按光阴极覆盖率 75%，光阴极的直径为 500 毫米，将需要 16875 只，如**表 5-1 江门中微子实验所需的 PMT 尺寸和数量**所统计。

另外江门中微子实验还需要 2000 只左右的 PMT 用于探测外围水箱中，探测由背景粒子产生的切连柯夫光信号，实现甄别背景的反复合。这 2000 只光电倍增管安置在大约 40 米直径的网架上，需要覆盖的面积为 5000 平方米左右。由于物理要求要低于前述液闪光探测器，可以使用与大亚湾中微子实验相同的 203 毫米（8 英寸）PMT，其参数指标可以略低于中心探测器的光电倍增管。

表 5-1 江门中微子实验所需的 PMT 尺寸和数量

PMT 位置和覆盖率	ϕ500 毫米	ϕ250 毫米
所需 PMT 总数 安装直径 37.5 米，光阴极覆盖率 70%	**15750**	**2000**
所需 PMT 总数 安装直径 37.5 米，光阴极覆盖率 75%	**16875**	**2000**

江门中微子实验的 PMT 采用双碱光（BA）阴极。与光子探测效率也相当好的多碱（MA）光阴极相比，BA 光阴极的光谱灵敏度与液体闪烁体的发光光谱匹配更好，而且暗噪声低。BA 光阴极光电倍增管的具体指标由**表 5-2** 给出。此表中的参数以真实的实验条件给出，即 PMT 浸泡于纯水或白油中，入射光可从 PMT 的入射前窗的各个方向入射。因为一般光量子效率的测量，是在空气中入射光垂直于 PMT 入射窗的条件之下给出的，因此这一要求会对量子效率的指标产生微小的影响。

5.1.2 PMT 设計指标

新型 MCP-PMT 设计指标详见表 5–2 所示。

表 5-2 江门中微子实验的 PMT 技术参数

参数	指标	说明
直徑 （毫米）	508	
光阴极直徑 （毫米）	500	平均玻璃壁厚 4 毫米
峰值光量子效率	> 38%	波长 380~440 nm
光电子收集效率	> 90%	
全入射面平均光子探测效率	> 35%	量子效率与收集效率乘积
光谱灵敏度范围（nm）	300–650	闪烁光谱峰值在 425nm
渡越时间散布（ns）	5 ns	半高全宽度
增益	> 10^7	
单光电子峰谷比（P/V）	> 2	
暗噪声典型值（20°C/ 0.25 pe）	30 kHz	参照滨松 R3600-2 给出
线性范围 （pe）	0.1 - 1000	
动态范围 （pe）	0.1 - 4000	
前噪声	< 1%	
后噪声	< 1%	
离子反馈噪声	< 5%	< 200 μs
最大承水压 （大气压）	4.2	测试标砖 9 大气压
^{238}U 含量 （g/g）	1×10^{-8}	参照蔡啸估算取整数
^{232}TH 含量（g/g）	2×10^{-8}	参照蔡啸估算取整数
^{40}K 含量（g/g）	10^{-5}	参照蔡啸估算取整数
寿命（年）	> 20	

5.2 PMT Design (以及 options)

5.2.1 自主研制的动机

江门中微子实验对液体闪烁探测器所使用的大型光电倍增管的关键指标是光子探测效率要达到 35%以上，商业产品不能达到这一要求。因此自 2009 年初起，高能物理研究所组织了国内相关的科研机构，以及生产厂家，成立了一个大型高效率 PMT 的合作研发组，开始了自主研发的尝试。如果自主研发由于研发周期、技术水平、性能指标、成本等原因而达不到预期目标，江门中微子实验组计划采购市场上最接近实验需要的指标的光电倍增管。如果光子探测效率达不到以上给出的 35%，则需要在实验方案和探测器的设计上进行相应的调整。

值得指出的是，2009 年高能所由王贻芳副所长带队访问南京的时候，曾与国内生产光电倍增管的最大企业，原电子工业部 741 产接洽，向他们介绍了下一代中微子实验对大型 PMT 的需求。这次接洽，促成了原 741 厂 PMT 车间负责人杨某某与两位北京企业家联手，购买了法国 PHOTONIS 的 PMT 生产线和全部技术，成立了海南展创光电技术公司。目前展创公司为江门中微子实验研制 PMT 的工作正在进行之中。同时，高能所也与世界最大的技术最先进的日本滨松光电公司多次交流。日本滨松公司为日本的下一代中微子实验和中国江门中微子实验研制的 20 英寸 PMT 也取得的相当的进展。本节将对 PMT 的自主研发和商业采购，分别进行讨论。

5.2.2 PMT 的自主研发的计划

以高能所为主导的大型真空 PMT 的研发开始于 2009 年初，当时被称为大亚湾二期工程正在筹划初期。实现大亚湾二期物理目标的主要障碍之一，是没有可用的光子探测效率能够达到要求的 PMT。当时国内主要的两家 PMT 生产厂家，即属于电子工业部的原南京 741 厂已经停产多年，属于核工业部的北京 261 厂也已经被日本滨松公司收购。国内研究院和大学中有关的研究工作也已停止多年。

因为光子探测效率等于光阴极的量子效率和光电子的收集效率的乘积，提高光子探测效率可以从两方面着手。真空 PMT 光阴极的量子效率定义为：光子自空气中垂直射入 PMT 受光面之后，被光阴极层转化为进入真空的光电子的百分比。常规的 BA 光阴极的量子效率的频谱响应如图 5-1 中的蓝色曲线所示，与液体闪烁体发光光谱符合良好，其效率峰值在 420nm，量子效率接近 30%，

对闪烁体发光的平均探测效率在 25%左右。大型 PMT 整个光阴极面上的平均量子效率往往要低于理想值。

以日本滨松公司为日本神岗中微子实验研制的型号为 R3600 的 20 英寸 PMT 为例，其玻壳外径为 508 毫米，采用前窗入射式透射光阴极，在其直径为 460 毫米有效光阴极范围之内平均量子效率为 20%左右，光子探测效率仅为 14%。远远不能满足江门中微子实验的要求。

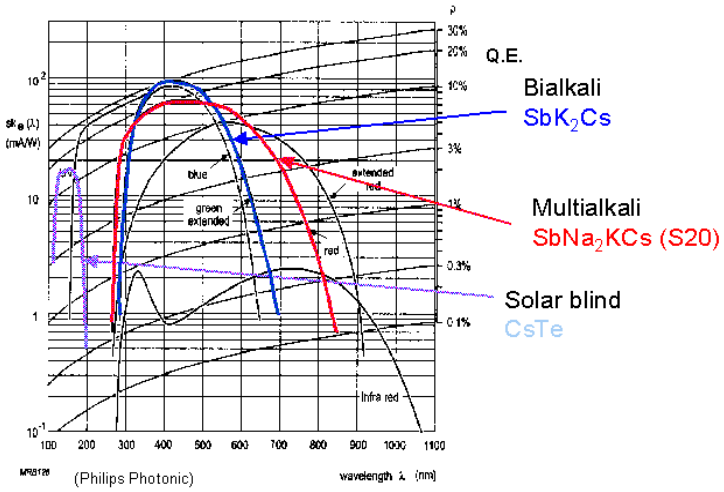


图 5-1. 日本滨松公司提供的各类光阴极灵敏度和量子效率光谱响应曲线

高能所 2009 年提出了一个用全球面的光阴极，即前半球面为透射式，后半球面为反射式，由置于球中心的两组微通道板（MCP）组件，分别接收光电子前后半球面的光电子的设计构想（见图 5-2）。

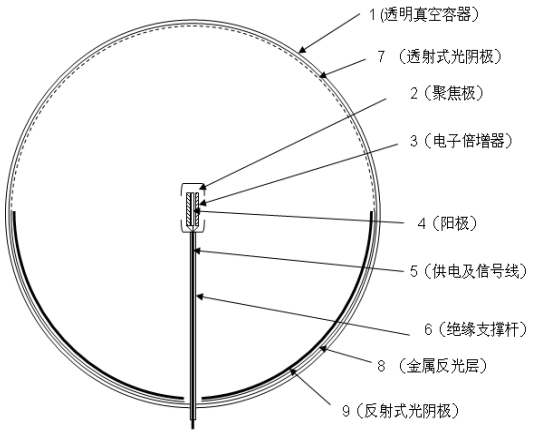


图 5-2. 高能所提出的新型高效大面积 MCP-PMT 原理图。

以此方案为基础，高能所试图组织国内真空 PMT 的研制的相关单位，自主研制江门中微子实验所需要的 PMT。在原理验证阶段高能所选择的合作对象为南京电子器件研究所，经过大约 2 年的努力，成功的得到了 5 英寸的样管。其间有北京核仪器厂，中科院西安光机所，陕西宝光等机构陆续加入这一项目，

南京电子器件研究所因各种原因退出。《微通道板大面积光电倍增管研制合作组》2010 年底开始筹备，2011 年 9 月正式成立（以下简称《合作组》），除上述单位之外，北方夜视集团公司，包括其南京和昆明分公司，正式加入，海南展创公司曾作为观察员参与了合作组早期的会议。合作组决定，从 8 英寸样管入手，同时开展 20 英寸大型管的技术准备工作。目前合作组的工作已经进行了两年半。

5.2.3 大型高效率 PMT 自主研制現狀

大型高效率真空光电倍增管的关键包括：大型高强度透光耐纯水腐蚀的玻壳（原料和烧制工艺）、玻壳底部与金属引出线封装（铟封或烧熔封）、大面积增透膜和光阴极蒸镀工艺、碱源和金属锑源、光电子放大器、电子光学设计、高速电信号保真传输、大型 PMT 性能测试等。每一种关键技术都有一系列的细节难点需要解决。这一系列的技术中的大多数国内均不具备，需要合作组群策群力，共同开发研制。目前按照高能所提出的方案制作的 8 英寸样管已经达到了一定水平。20 英寸球形玻壳以及与引出金属线的封接也已经基本解决，完整的 20 英寸样管的研制正在抓紧进行。

5.2.3.1 方案的论证

1）透射和反射式光阴极结合的效果

西安光机所基于自身的技术优势，对高能物理研究所提出的球形 PMT 前入射面内镀透射式光阴极，后半球面内渡反射式光阴极的方案进行了详细的理论论证，结论是通过优化光阴极渡膜厚度，这种透射和反射相结合的设计，可以得到比仅使用前入射面内镀透射式光阴极得到更高的量子效率。目前，合作组正在根据理论计算的结果，进行实验验证。

2）电子光学模拟

电子光学设计对光阴极所产生的光电子收集效率极为重要。西安光机所利用计算机软件对 8 英寸和 2 0 英寸的管型，进行了详细的模拟计算，如图 5-3 所示。模拟计算考虑了 MCP 组件的设计和安放方式、支撑结构和引线、聚焦电极，以及各个电极上所加的电位，并考虑了地磁场的影响，得到优化的设计，对于样管的研制提供了指导。

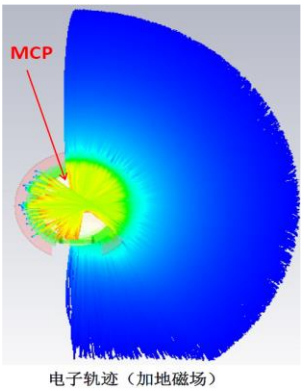


图 5-3. MCP-PMT 电子光学模拟原理图

3）微通道板性能模拟

西安光机所对 MCP 的电子收集和电子放大过程进行了理论模拟，如图 5-4 所示。对优化 MCP 组件设计提供了　技术依据。使用 MCP 作为 PMT 的电子放大器，具有结构紧凑、放大受地磁场影响小、动态范围大等优点，但也存在电子收集效率、寿命等参数待提高等问题。

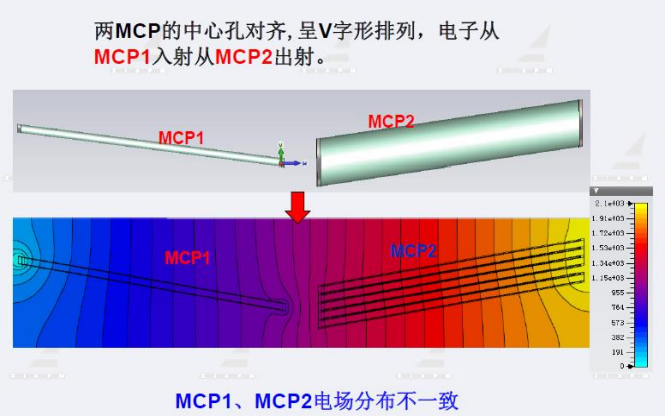


图 5-4. MCP 模拟原理图

5.2.3.2 微通道板和组件

北方夜视公司为此项目成立了专门的研制组，企业投入了相当的资金和技术力量，根据 PMT 的需要对 MCP 参数进行了调整，及时提供样管所需要的高增益 MCP。合作组对微通道板组件进行了优化设计。

5.2.3.3 玻壳和原料

8 英寸玻壳采用的材料是传统的电真空玻璃，其主要特点是热膨胀系数与可伐合金材料一致，玻壳与可伐合金管脚的封接简单。其缺点软化点和液化点温

度较接近，且软化之后料性不好，不可能用于吹制 20 英寸大型玻壳。而且即使吹制成功，电真空玻璃还有机械强度较差，耐水压能力差，在水中由于碱金属氧化物的溶出，表面透光率变差的问题。因此，20 英寸的玻壳必须采用高强度高化学稳定性、料性极佳的硼硅玻璃吹制。但是硼硅玻璃的热膨胀系数与可伐合金差距较大，必须使用多次过渡的方法，才能实现与可伐合金的封接。目前经过合作组努力，20 英寸硼硅玻壳的吹制，过渡玻璃管的研制，都已经完成。得到的英寸 20 英寸管壳外观质量良好，尺寸精确（图 5-5 为测试外形尺寸），厚度均匀，耐水压测试证明可以承受 9 个大气压。

由于江门中微子实验本身信号计数率极低，且 PMT 用量大，所以 PMT 所含有的天然放射性同位素的含量必须严格控制。而 PMT 的放射性本底主要来源于玻璃，特别是 ^{238}U、^{232}TH、^{40}K。经实测，日本滨松公司为大亚湾提供的底本底 8 英寸光电倍增管的非常高，远远超过江门中微子实验所能接受的标准。为此，合作组与协助吹制 20 英寸玻壳的厂家，共同努力，在测试了大量不同来源的玻璃原料之后，确定了两种国产的玻璃原料合乎要求。对于 20 英寸玻壳的进一步测试，例如光学性能、放射性含量等需要等 20 寸样管定型之后，进入小批量产之时，厂家用满足我们要求的原料，吹制一批玻壳之后才能进行。

图 5-5. 封装完成的 20 英寸玻壳在机械尺寸测量台上

5.2.3.4 光阴极

光阴极是自主研制 PMT 的关键项目。双碱光阴极是在玻璃基底上镀金属锑基底，然后蒸镀碱金属钾、铯，经高温反应形成的半导体薄膜，其化学分子式一般认为是 K_2CsSb。合作组中的几家成员根据各自掌握的双碱光阴极的制备技术进行改进，并研究大面积光阴极制作技术，取得了相当好的效果。

5.3 Manufacture & assembly

5.3.1 大面积微通道板光电倍增管研发

由于光电倍增管的生产工艺繁杂，前期基础研究投入和生产中劳动力成本都很高，新产品开发周期长、设计研究需要投入大量经费，等诸多因素限制了光电倍增管产业的发展。而研制生产新型光电倍增管涉及到的基础设备投入非常之高，涉及到的技术领域比较广，为此，高能所必须联合国内光电倍增管和微通道板生产厂家和研究单位，结合研究所基础研究的优势和工厂加工量产的优势，制定可行的结构与工艺设计方案，通过实验验证，最终研制出满足使用要求的产品。

光电倍增管不同于其他电子器件，无法在每一个生产环节完成后进行性能检测，只有在完成所有组装工序，抽真空达到一定要求后，才能进行性能测试，确定该产品是否满足设计指标。为此，工厂在光电倍增管的生产研发过程中，由于真空条件、洁净条件的限制，基本上每一次性能实验都是破坏性的、一次性的，将会消耗大量的人力、物力和时间，使研发成本居高不下。

所以，针对此款新型 MCP-PMT 使用到各个元器件进行分解，有针对性的专门研究和改进，使其分离元器件的性能指标和使用状态达到最佳，组合后样管的性能保持稳定性，为大规模工业化量产积累经验。如**图 5-6** 所示,可将大面积微通道板 PMT 研制划分为如下研究专题:

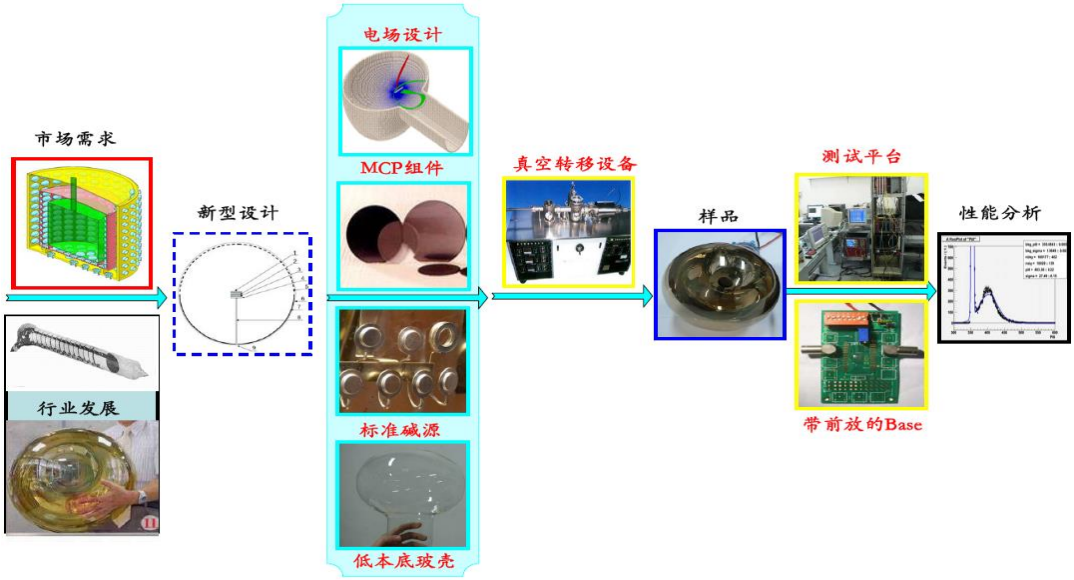


图 5-6. 大面积微通道板光电倍增管研发路线图（空间）

①碱源: 高量子效率标准碱源开发及生产,保证研制样管性能一致性；

②玻璃: 20 英寸大面积低放射性本底玻壳研制；

③微通道板: 低噪声高增益 MCP 组件研制，多块 MCP 最佳性能的配合研究；

④电子学: 快速低噪前置放大器研制，与标准 Base 芯座的配合问题；

⑤设备研制: 大型真空生产/测试设备设计及制作；

⑥封装工艺: 电子光学系统设计及封装工艺开发；

⑦性能测试: 光电探测器件性能测试平台研发。

5.3.2 研究工作基础

5.3.2.1 中科院高能物理所工作基础

中科院高能物理所是享誉世界的高能物理研究机构之一，是本项目的发起者和策划者，在本项目中主要承担 MCP-PMT 器件测试、评价和应用任务。尤其值得指出的是，高能所于 2012 年，引领了由中、美、俄、捷等国家、300 多位科学家参加的中国大亚湾中微子实验，该实验用两千余只日本滨松 8 吋 PMT, 布阵巨型探测网，在全球首次测量到中微子的第三种振荡模式。这一成果轰动了全世界，赢得了国际物理学界的广泛关注和普遍赞誉，被列为 2012 年中国十大科技进展新闻，并入选美国《Science》年度十大科学突破。高能所科学家在这一实验成果中所积累的经验，以及他们所具备的 MCP-PMT 器件测试、评价和应用的实验条件，是本项目申请立项和最终取得圆满成果的极为宝贵的精神和技术财富。

项目所在课题组为中科院高能物理研究所飞行时间探测器组，隶属于"核探测技术与核电子学国家重点实验室"，购置和装备了一系列国内、国际先进的通用仪器设备和专用实验装置，包括探测器特性测量和研究平台、射线成像方法研究平台、正电子技术研究平台、电子学系统的辅助计算机设计和仿真设计平台等。

在北京谱议飞行时间探测器研制和大亚湾中微子实验的探测器的研制过程中，项目组积累了对 PMT 性能测试丰富的经验。建造的测试系统可以同时监测多个 PMT 的单光电子谱、相对量子效率、暗噪声计数率、线性、增益等 PMT 性能指标。此套测试系统可以满足大量 PMT 短时间内的测试要求。同时，在实验室内还可以搭建基于 CAMAC 或 VME 的测试系统，或者基于多道采集卡的便携式测试系统，满足在生产过程中快速性能检测。取数软件可以集成数据库，方便数据信息的管理和质量监控。图 5-7 为 PMT 性能测试实验室硬件网络框图。

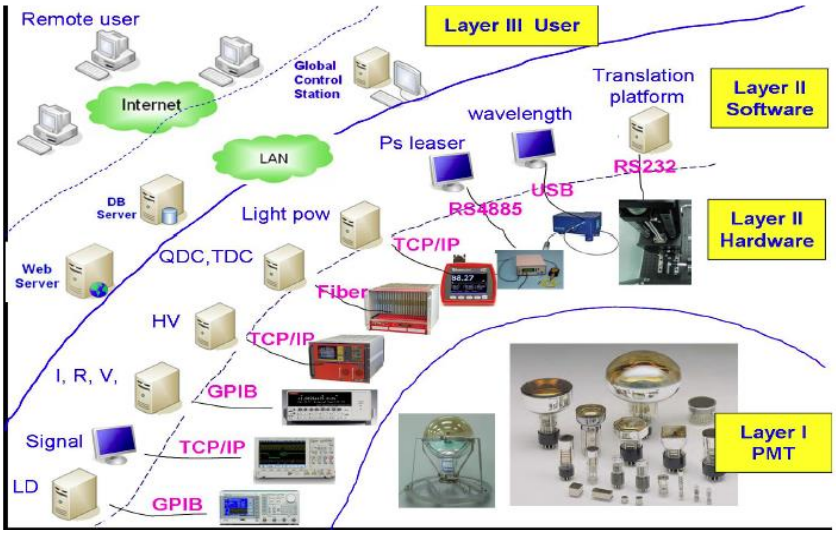


图 5-7. 已经建成的 PMT 性能测试研究实验室

在一年时间内（2012．06~2013.06），在中国科学院仪器装备研制项目（所级）的资助下，在万级洁净间的实验室内建立了具有电磁屏蔽的暗室，基于 VME 测试系统、高压系统和各种光学和电学测试仪器仪表，完善建立了“PMT 性能测试实验室”。可以快速而高精度的 QE、SPE、TTS 在内的各项表征光电倍增管的性能指标参数，如图 5-8 所示。并通过获取 PMT 的单光子性能的相关信息，计算出决定 PMT 性能指标的诸多参数：PMT 的量子效率曲线 QE（波长范围 230nm~1000nm；光阴极灵敏度精度好于 1μA/lm；量子效率测试相对误差优于 2%）；暗电流：精度 1pA，测试范围 10^{-12} A~10^{-8} A；PMT 绝对增益曲线：自动化控制高压加载，数据可快速分析；加前放，测试光电倍增管单光电子谱的最小增益为 $1*10^5$；SPE-Q 谱的峰谷比和分辨率可测；PMT 信号上升时间/下降时间测试精度好于 50ps；单光电子的渡越时间涨落可测，精度好于 50ps。

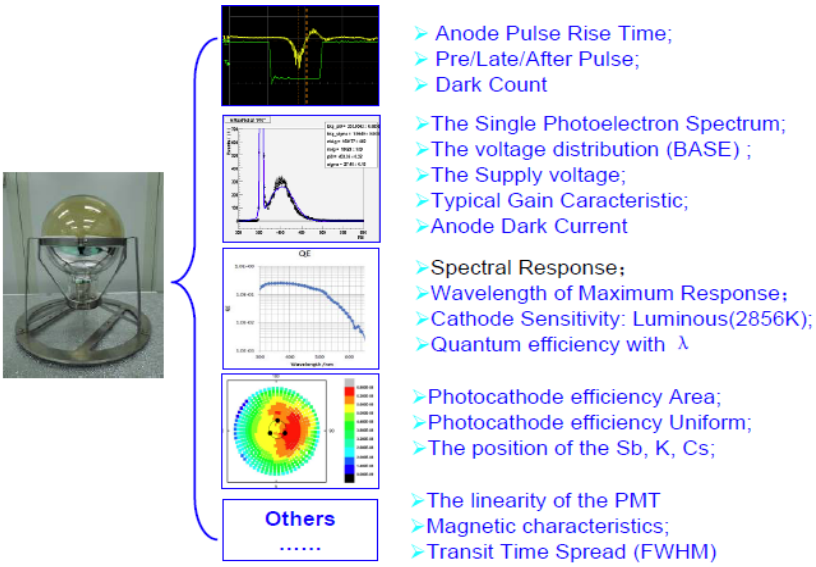


图 5-8. PMT 性能测试研究实验室可以测试 PMT 的各项参量

5.3.2.2 中科院西安光机所工作基础

西安光机所是国内外高速摄影学术界及技术界享有盛名的研究所，成立于1962 年，占地建筑面积 3200 平方米，拥有科学院院士、国家千人计划人才、博士、硕士和其他科技人员 2000 余名。下设有“瞬态光学与光子技术国家重点实验室”和“中国科学院超快诊断技术重点实验室”等十余个研究室，以及国际驰名、国内领先的电真空技术研究机构，已经积累了丰富的电真空技术和人才储备！可为本项目实施提供有力技术与科研条件支撑。

已建成三个研究平台,建筑面积 3200 平方米，其中，超净实验室 1340 平方米；工艺、测试和监控设备 56 台套，设备费用 3400 万元. 三个平台及其设备分别有：

① 电真空器件工艺平台:电子光学系统设计软件、高精度装配台，等离子清洗机，密封焊接与检漏仪，光电阴极激活台，灵敏度测试等工艺及测试设备，为高灵敏、高质量、电真空器件的稳定制备提供重要保障。

② 高速电子学技术及测试平台

射频电路设计软件、电路快速制作工作台、高频信号产生与测量等核心设备，具备了完整的射频电路设计仿真验证能力，提升了电子学模块设计、制造、集成及测试能力。为电真空器件的稳定性、工程化提供了重要保障

③ 电真空器件综合测试平台

可见光电真空探测器静态/动态测试系统、图像增强及快速采集系统，为电真空器件和设备的高质量、标准化、一致性控制提供了重要保障

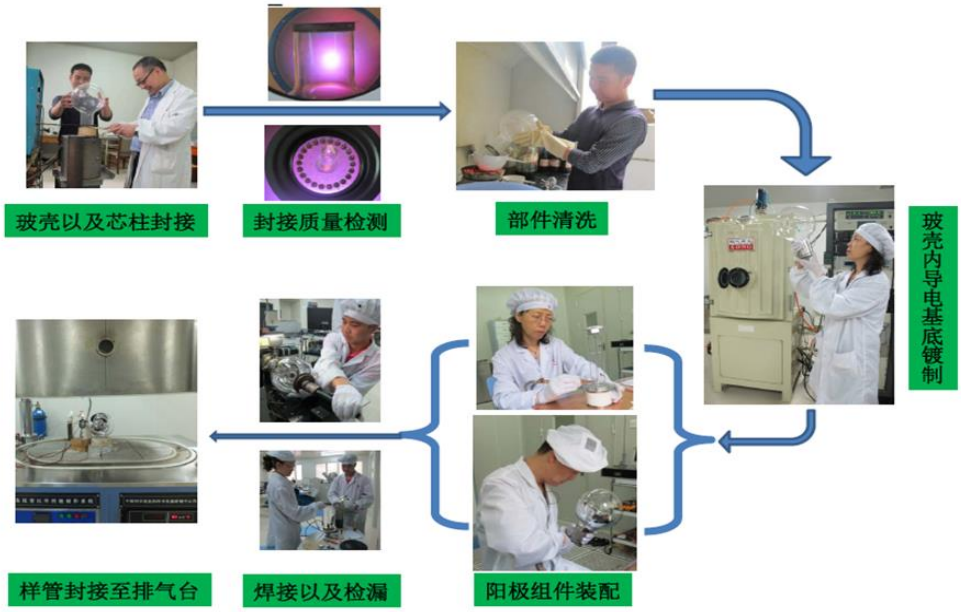


图 5-9. 西光所开发的 MCP-PMT 制备工艺流程图

研究所对本 MCP-PMT 项目的研制和申请给予高度重视，视其为本所电真空技术研究学科振兴和发展的契机，已经与兄弟单位协作，自筹资金，开展了Φ8 吋 MCP-PMT 前期预研工作，在 MCP-PMT 器件理论研究、器件设计、条件营造、工艺流通、性能测试等方面，取得了初步成果，并积累了宝贵的经验，（如图 5-9 所示）从而为本项目的申请立项，奠定了一定人力、物力和技术基础。

5.3.2.3 北方夜视集团公司工作基础

北方夜视技术股份有限公司于 2000 年 4 月 21 日在昆明高新技术开发区注册成立。2010 年 3 月，根据兵器工业集团公司整合资源、做大做强兵器夜视产业的战略决策和部署，211 所、298 厂、北方夜视技术股份有限公司三家单位整合重组为北方夜视科技集团有限公司，成为夜视集团下属子公司。

北方夜视技术股份有限公司是世界五大微光像增强器生产企业之一，是国内唯一能批量生产微光像增强器、微通道板，并具有研究、设计、开发、试制能力的高新技术企业。公司通过技术引进及自主创新，始终占据微光像增强器技术国际一流、国内领先的地位，产品在军品配套及国内外准军事领域及民用市场得到广泛应用。

公司微通道板生产线项目获得国家科技进步二等奖、Φ25（6μm）微通道板获得过国防科学技术成果二等奖等众多国家、省部级奖项。夜视集团在双碱阴极、多碱阴极制作方面有着三十多年的研制和生产经验，经过长期的积累和研究，阴极制作技术已经有了长足的发展，具有很强的光电阴极研究能力和制作技术，多碱阴极灵敏度已达 900μA/lm 以上，处于国际先进水平。

夜视集团在阴极激活装置、专业测试设备等方面有多年的研究和制造经验，在从国外引进设备的基础上，吸收、消化国外先进技术，逐步发展自己在阴极激活装置和检测设备的研制能力，并拥有一支专业的设备研制队伍。公司在开展大面积 MCP-PMT 项目中，可以自主研制出满足要求的专用阴极激活装置和专业测试设备，具有关键设备和检测仪器的研制能力。

已建成三个研究平台,建筑面积 10000 平方米，其中，超净实验室 6000 平方米；工艺、测试和监控设备 400 台套，设备费用 25000 万元. 三个平台及其设备分别有：

①微通道板研究平台

拥有玻璃材料熔炼炉、拉丝机、自动腐蚀设备，镀膜设备、微通道板综合性能测试仪等工艺及测试设备，电子光学模拟软件等设计软件，有条件开展新型微

通道板的设计、研制工作，为大面积微通道板型光电倍增管的研制提供高增益、低噪声的高能性能微通道板，为大面积光电倍增研制、工程化、标准化、一致性在微通道板领域提供了重要保障。

②微光管研究平台

拥有光电流测试仪、微光管综合性能检测平台、微光管转移制造设备、多碱阴极激活监控设备、微光管灵敏度综合测试仪、等离子清洗机、荧光屏专用镀膜设备、高量子效率专用镀膜设备、透过率测试仪、零配件处理设备、电源制造设备等全套的工艺、测试设备，以及国内领先的阴极激活设备研制能力，为大面积光电倍增管、专用设备的高质量、标准化提供了重要的保障。

③光电倍增管研究平台

拥有玻璃车床、退火烘箱、高频焊机、大尺寸超声波清洗机、洁净烘箱、点焊机、导电膜蒸镀装置、转移阴极激活装置、非转移阴极激活装置、阴极激活监控台、电子光学模拟设计系统，光电倍增管动态测试系统（图 5-10 所示）、光电倍增管静态测试系统等全套的设计、工艺、测试设备，为光电倍增管的研制、工程化提供了重要保障。

图 5-10. 夜视集团开发的 MCP-PMT 制备设备

5.4 R&D results and plans

5.4.1 MCP-PMT 研究现状

截止 2014 年初，MCP_PMT 合作组主要进展如表 5-3 所示。

表 5-3. 现阶段主要研究进展

序号	主要研究进展	完成情况
1	8 吋 MCP-PMT	完成预期研制任务
2	20 吋玻壳及其过渡节	达到预定技术指标
3	测试设备	稳定、可靠
4	工艺、设备	8 吋工艺基本固化；转移设备调试完毕

5.4.1.1 8 吋 MCP-PMT 样管研制

合作组全年组织三次联合攻关，二次技术交流和五次合作组会议，在电子光学设计、阴极工艺改进、微通道板组件设计、电子清刷处理以及阳极设计等领域，进行了大量的研究工作，使得阴极灵敏度逐步上升，阴极量子效率由原来的百分之几稳步攀升到 30%，而且可以重复；优化的电子光学设计再加上高的量子效率，力争使得 MCP-PMT 的光子探测效率达到 24%；新设计的微通道板及其组件，经过电子清刷处理后，增益绝大多数在~10^7，个别达 10^8，比预期指标高 100~1000 倍；老练后，暗电流低于 10 nA； 综合反映 PMT 探测能力的单光子谱的峰谷比多数在 1.6~2.5,个别达 3.8；单光电子信号没有失真。主要参数和测试单光电子谱见图 5-11。

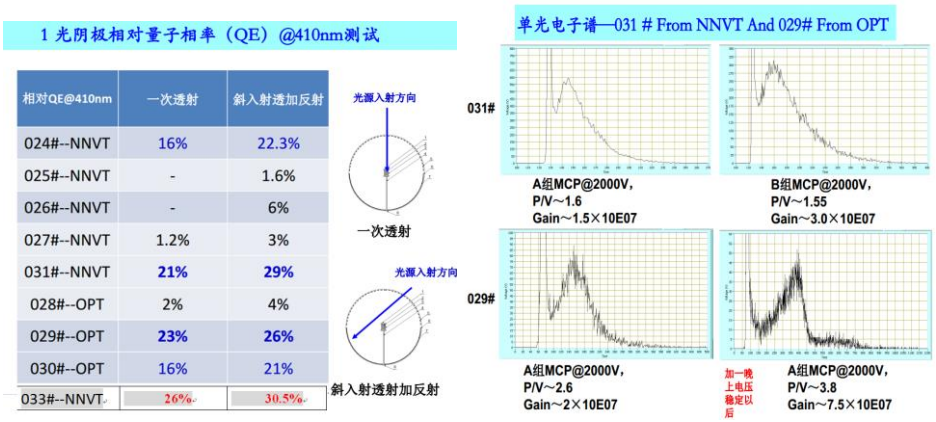
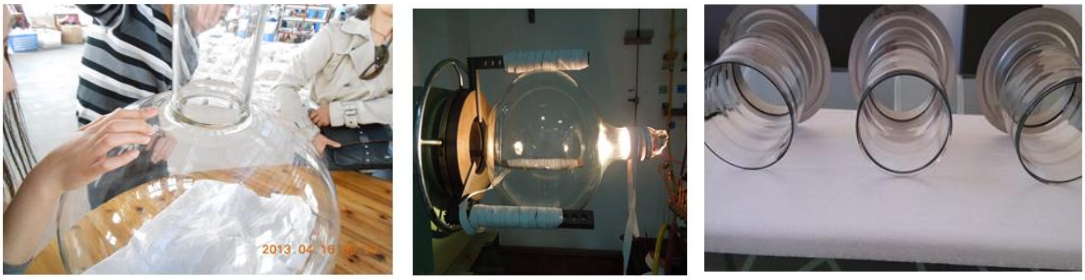


图 5-11. MCP-PMT8 吋样管 QE 测试和单光电子谱测试

5.4.1.2　20 吋玻壳及其过渡节

考虑到 20 吋 MCP-PMT 玻壳满足诸多技术要求，我们采用北京特硬料玻璃，其膨胀系数小（33×10^{-7}/℃），抗压应力强，耐酸碱腐蚀，而国内能吹制这种大尺寸的玻壳的技术工人不到 10 人，项目组几经努力，终于找到了一家工艺比较稳定、技术比较成熟的单位， 经过多次实验，吹制出 50 支合格的外径达 20 吋的玻壳，其误差不到 0.6mm；考虑到最终产品须与可伐合金进行气密性封接，采用 3 种过渡方式来实现玻壳的气密性封接，最后与可伐封接后，在 1MPa 的水压（相当于 100 米水深）验下，24 小时玻壳完好。具体情况详见图 5-12 所示。



刚吹制出的20吋GG-17玻壳　　疵病的检验　　过渡节及其与可伐的封接

图 5-12. MCP-PMT 20 吋样管玻壳

5.4.1.3 完善的测试设备

由于我们这种 MCP-PMT 光阴极面是球面，尺寸大，测试方法、手段和评价体系不同于传统的 PMT， 需要开展相关研究，目前，已完成 70 平米的实验室洁净改造，购置激光器、光学测试平台等（图 5-13 所示），可以开展光阴极量子效率测试、均匀性测试、暗电流、单光电子谱、增益以及地磁场影响等测试，并采用刻度好的样管，其测试结果可与国内外进行比较，测试结果稳定、可靠。

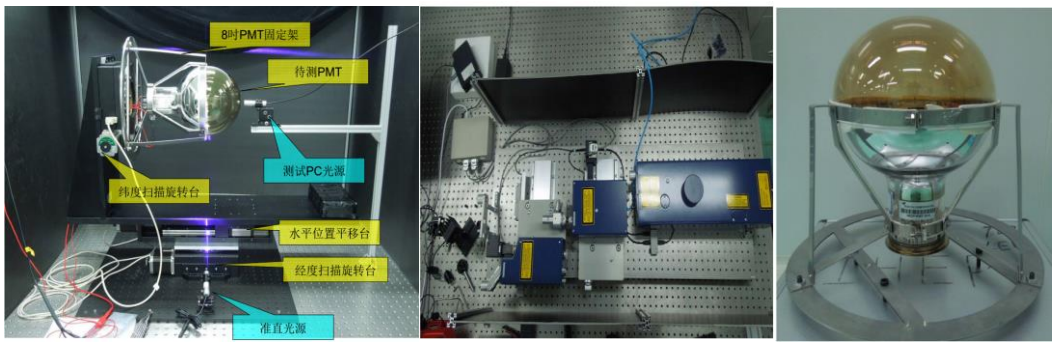


图 5-13. MCP-PMT 测试实验室设备图

5.4.2 商业大型高效率光电倍增管的现状

5.4.2.1 日本滨松公司现状

近年来，国外 PMT 厂家开发了被称为 SBA（超双碱）的改进型 BA 光阴极技术，并将此技术用于大型 PMT。

目前 SBA 的峰值灵敏度在波长 390nm 处，与神岗中微子实验测量的切连柯夫光谱匹配较好，但与与光谱集中在 400~450nm 的液体闪烁发光光谱的匹配稍差。但总起来说，SBA 与 BA 技术相比光阴极的量子效率有了较大幅度程度的提高。8 英寸 SBA 量子效率比采用传统 BA 光阴极 20 英寸的 R3600 的光量子效率提高 30%以上，峰值量子效率达到 30~35%。东京大学的测试结果显示，目前测试的 8 英寸 SBA 样管的暗噪声要高于传统的 20 英寸的 R3600PMT。

据东京大学 2014 年 1 月 28 日报道，他们已经测试了第一批 5 只 20 英寸 SBA 样管，其中 2 只稳定性欠佳。预期将在 2014 年春季对第二批 20 英寸 SBA 样管开始测试，在 2014 年内在 200 吨水箱进行测试。滨松公司的 20 英寸 SBA PMT 峰值量子效率的设计目标是 30%，采用传统的线性聚焦打拿极，计划把光电子的收集效率从 R3600 的 70%提高到 93%，同时改善信号的时间散布。如果滨松能实现其新型 20 英寸 PMT 的设计目标，其光子探测效率的光谱峰值可已达到 28%，平均光子探测效率估计可以达到 25%左右。但目前尚未见到实验测试结果支持这一推测。目前滨松 20 英寸的 PMT 设计的有效光阴极覆盖，比入射窗内径略小。

5.4.2.2 3.2.1 海南展创

海南展创公司从法国 PHOTONIS 公司获得了 SBA 技术，目前已经制成了 3 英寸高效 PMT 样管。海南展创许诺 2014 年底之前，为江门中微子实验提供 20 英寸 SBA 高效 PMT 样管。具体的技术指标尚未可知。

5.5 Risk analysis, safety, etc

5.5.1 PMT 的 QE 不高导致的风险

江门中微子实验要求其探测器的能量分辨率小于 3%，这就要求一方面尽可能提高液闪的发光效率、提高其衰减长度、以及充分利用瑞利散射等，另一方面，则务必提高探测器阵列的阴极覆盖度和阴极本身的量子效率，以实现高光子探测效率。 而提高 PMT 的阴极覆盖度对于设计中心探测器而言，就是提高 PMT 密集排列，降低空隙，其措施在中心探测器中已有描述。对于单个 PMT 而言，则是尽可能使得阴极覆盖球面的各个区域，我们的球形 MCP-PMT，其外径为 500mm，壁厚在 4mm 左右，其阴极为球内表面除脖子附件外，基本覆盖，这样，阴极覆盖度至少为：（245/250）2×100%=96%。但如何提高阴极（在此为双碱阴极）的量子效率，特别是在液闪发射光谱范围内的量子效率，则是光电倍增管研制的重要课题。图 5-1 是普通双碱阴极的辐射灵敏度随波长的变化关系曲线（实线部分），由此通过公式计算其在相应波长下的量子效率:

$$\eta = \frac{hc}{e}\frac{s}{\lambda}$$
$$= 1.240 \times 10^{-6} S/\lambda$$

式中：S 为对应波长为 λ 下的辐射灵敏度（单位 mA/w） , λ 是以 nm 为单位的波长。由此计算出的量子效率随波长变化关系曲线如图 5-1 中的虚线所示。为了便于了解液闪的反射光谱，在图 5-14 中，用红线表示其发射光谱。

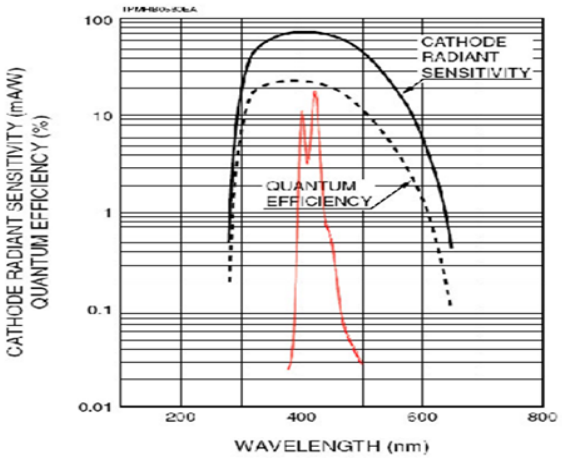


图 5-14. 普通双碱阴极的辐射灵敏度、量子效率以及液闪的发射光谱

从上图可以看出，普通 PMT 的双碱阴极，峰值量子效率略低于 30%，在 400~440nm 处，一般在 20~25%左右。从理论推算可知，江门中微子实验，要求 PMT 的量子效率在液闪的发光光谱峰值左右，至少要达到 33%以上，峰值量

子效率应向 400nm 靠近，最好不低于 35%，如果能够制作出如图 5-15 所示的几种理想曲线所示的光电阴极，则是再好不过的事情了。

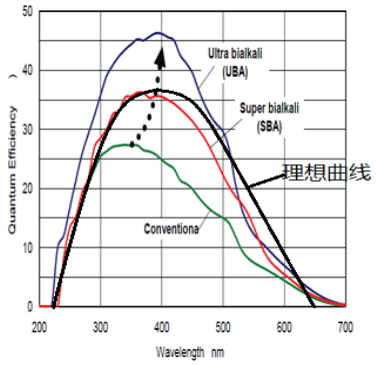


图 5-15. 各种量子效率曲线

本项目的风险之一是光阴极的量子效率（在 400～440nm 范围内）能否达到 30%以上。采取如下措施，则可以避免上述风险。

（1）采用透射阴极＋反射阴极：

如图 5-2 所示，采用高能物理所早期所设计的技术方案，合理设计并制作透射阴极和反射阴极，完全有可能制作出高量子效率的双碱光阴极，使得两者之和的峰值大于 35%，在 400～440nm 范围内，大于 30%。

（2）透射阴极＋高反射薄膜：

如图 5-16 所示，将反射阴极换成在 400～440nm 具有极高反射率的薄膜（如铝膜），通过透射阴极的部分光子在该表面反射，并在阴极的内表面与阴极作用，产生新的光子，由此增加光阴极的量子效率，但时间特性特别是渡越时间及其分布变差， 只要不太影响总的物理要求，也不失是一种很好的措施。

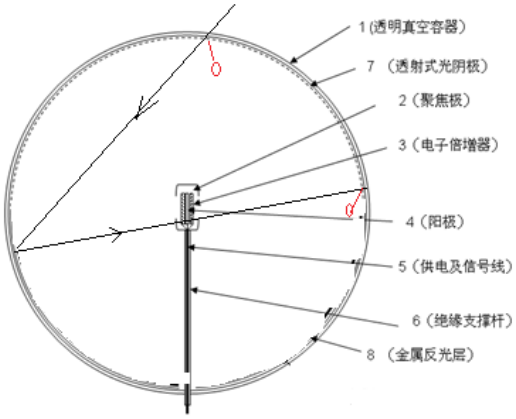


图 5-16. MCP_PMT 光阴极增加增透膜示意图

5.5.2 MCP 组件的寿命的风险

江门中微子实验，设计寿命至少 20 年，这就要求 MCP-PMT 的寿命不短于 20 年。一般而言，MCP-PMT 不意外漏气的话，或者管内放气量不大（管内有消气剂）时，其阴极灵敏度不会降低，影响其寿命的重要因素是电子倍增器的老化导致增益下降。对于 MCP-PMT 而言，主要是 MCP 组件的增益的下降。图 5-17 左图是两种不同材料制作的 MCP 其增益随累计拾取的电荷量（输出电流一定时，实际工作的时间）的变化关系，通用的 MCP 在累积拾取电荷量达 0.5C 时，增益降低一倍多，而长寿命 MCP 则在 0.8C 后还能保持在原有稳定增益的 80%。而图 5-17 右图则表明：在长达近 40C 后，MCP 的增益还能维持到其稳定增益的 75％以上。

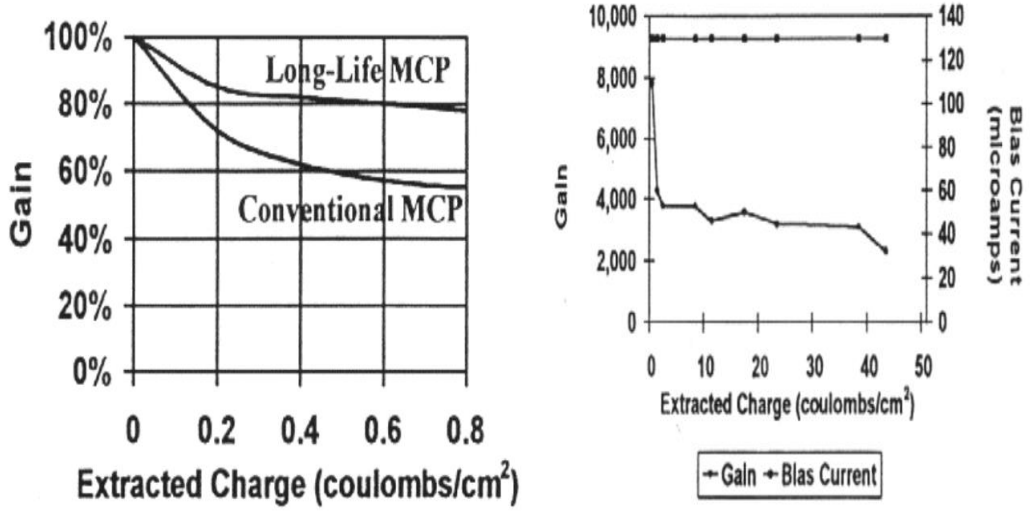


图 5-17. MCP-PMT 阳极输出电荷量随时间的变化关系----老化

我们可以估算一下 MCP（第二块 MCP）的累计拾取电荷量，如阳极暗电流为 10nA,工作 20 年则第二块 MCP 的累计拾取电荷量至少 6.3C，考虑到探测信号消耗掉几个 C，则 MCP 的寿命至少在 10C，看来传统的 MCP 满足不了设计要求，好在合作组研制出高稳定性 MCP 材料，其累计拾取电荷量在 30C 以上，可以满足实验要求。

还用一种可靠保证，就是采用 ALD 工艺，在玻璃通道内分别生产阻性层和二次电子发射层，尔后蒸镀电极，这样制作的微通道板，不仅其一致性好，而且其增益高、噪声低易于工艺处理，而且更为重要的是，其工作寿命更长，估计在 50C 以上。目前，高能所正购置该设备，准备投入人力和物力，争取能够在 MCP-PMT 中得到应用。

5.5.3 电倍增管本身放射性本底带来的风险

5.5.3.1 玻壳中的放射性本底要求

根据中心探测器的总体要求，以及不同的物理目标， 低本底的 20 吋 PMT 必然会带来很多优点，而且能够改变总体设计方案，降低造价。大亚湾一期采用的日本滨松 8 吋的 PMT，其玻壳采用无钾玻壳，即便如此，其放射性元素 ^{238}U、^{232}Th、^{40}K 含量还是比较高的，分别为：153±25ppb、335±90ppb、18.5±5ppb（蔡啸报告），目前日本滨松提供的其它性能最好的 20 吋 PMT，但其玻壳的放射性元素含量更高，分别为：540.3±37.3ppb、568.3±56.6ppb、75.2±5.1ppb（蔡啸报告）。

江门中微子实验对此要求很高，理论模拟表明：其对 PMT 上述 ^{238}U、^{232}Th、^{40}K 含量分别限制在：12.1 ppb、26.1 ppb、1.5 ppb。要想获得低本底 PMT，首先要降低玻壳中的上述放射性同位素的含量，考虑到我们玻壳的设计采用 GG-17 玻璃的玻壳主体在加上过渡节以及封接用的可伐和玻璃芯柱，就玻壳主体和过渡节玻璃（如图 5-18 所示）而言，从总重量考虑，前者的重量约为 8.5Kg，后者最多为 0.4 Kg，故前者的本底最为重要。

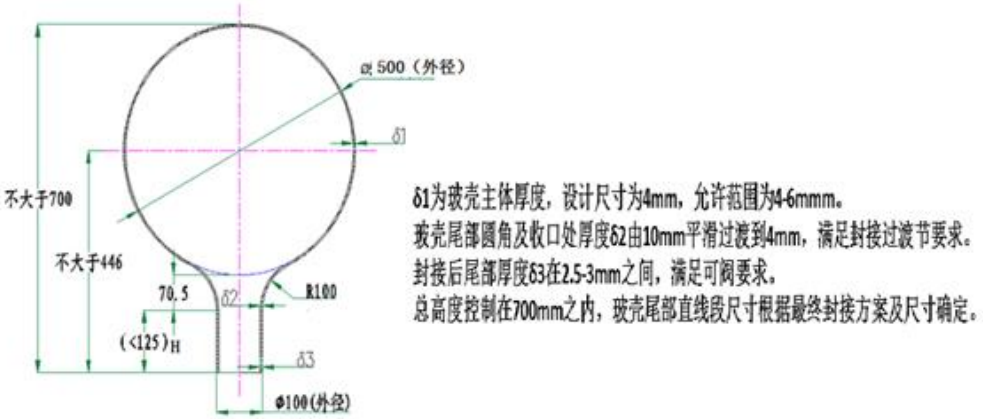


图 5-18. 20 吋 PMT 玻壳主体及其过渡节的几何尺寸及其要求

首先来看现有无钾 GG-17 玻壳主体，测得其 ^{238}U、^{232}Th、^{40}K 含量分别为：349.1±18.7ppb、851.2±72.8ppb、26.3±3.1ppb，分别比我们的最终要求高 29 倍、32 倍、17.5 倍。

5.5.3.2 我们的对策

①从原材料考虑

精心挑选熔炼 GG-17 玻璃的主要原材料，使得其上述放射性元素降到最低。GG-17 玻璃的主要成分及其引入原材料见下表：

表 5-4. GG-17 玻璃主要成分表

化合物	SiO_2	B_2O_3	Na_2O	Al_2O_3	NaCl
含量 %	80.0	13.0	4.0	2.5	0.5
引入的原料	石英砂	硼酸/硼砂	Na_2CO_3/硼砂	氢氧化铝	精盐

为此，我们选择不同供应商的涉及到上述原材料，测试其 ^{238}U、^{232}Th、^{40}K 含量，则在很大程度上能够降低由此带来的本底。由于石英砂的含量在玻璃中占 80%以上，如果将其放射性元素含量降低到最低，则是问题的干建，下表为遴选的石英砂的上述放射性元素的含量如表 5-5 所示：

表 5-5. 玻璃样品放射性低本底测试数据

样品名称	U238含量 Bq/kg	Th232含量 Bq/kg	K含量 Bq/kg	U238含量 ppb	Th232含量 ppb	K含量 ppm
1#南京石英砂	≤0.24	≤0.16	3.89±0.32	≤19.4	≤39.4	125.6±10.3
2#南京石英砂	≤0.21	≤0.15	0.60±0.09	≤17.0	≤36.9	19.4±2.9
3#南京石英砂	0.38±0.10	0.46±0.06	5.23±0.37	30.1±8.1	113.2±14.8	168.9±12.0
4#南京石英砂	≤0.20	≤0.18	0.67±0.09	≤16.2	≤44.3	21.6±2.9
5#南京石英砂	≤0.25	≤0.18	0.89±0.11	≤20.25	≤44.28	28.7±3.6
6#南京石英砂	≤0.22	≤0.16	2.61±0.25	≤17.82	≤39.36	84.3±8.1
8#蕲春石英砂(70~120目)	≤0.23	≤0.16	2.99±0.28	≤18.63	≤39.36	96.58±8.91
9#高纯石英砂(70~140目)	≤0.20	≤0.15	0.260±0.004	≤16.20	≤36.90	8.40±0.12
10#高纯石英砂(60~140目)	≤0.20	≤0.15	1.51±0.15	≤16.20	≤36.90	48.77±4.97
11#大韩石英砂(60~120目)	≤0.22	≤0.16	1.24±0.13	≤17.82	≤39.36	40.05±4.29
13#盐城石英砂	2.8±0.1	3.9±0.1	15.31±0.07	226.8±8.1	959.4±24.6	494.5±2.3
13#盐城石英砂(IHEP结果)	3.14±0.48	4.03±0.32	14.87±1.70	254.3±38.9	991.4±78.7	480.3±54.9

从上表中可知，9#纯石英砂的相关本底最低，注意最后一列是 K 的含量，折换成 ^{40}K，按照自然界中 ^{40}K 的丰度为 1.17×10-4 计算，则为 0.98ppb。为了进一步确认 9#纯石英砂的准确性，在清华大学的高精度低本底测试设备上，再进行测量，获得的 ^{238}U、^{232}Th、^{40}K 含量分别为：13.6ppb、6.4ppb、1.1ppb，达到江门中微子实验对低本底 PMT 玻壳的要求。

其它原材料的遴选，参考表 5-6 所示。这样，如果 GG-17 玻璃的 SiO_2 从 9#石英砂中引入，B_2O_3 从 6#硼酸中引入，Na_2O 和 Al_2O_3 分别从 2#纯碱和 6#

氢氧化铝中引入，则 8.5Kg 的玻壳主体中 ^{238}U、^{232}TH、^{40}K 含量分别为：13.6ppb、6.4ppb、1.1ppb。

表 5-6. 其他玻璃原料的低本底测试数据

样品名称	^{238}U 含量// Bq/Kg	^{232}Th 含// Bq/Kg	K 含量// Bq/Kg	^{238}U 含量// ppb	^{232}Th 含// ppb	^{40}K 含量// ppb
硼酸 1#	≤0.26	≤0.20	1.24±0.14	≤21.06	≤49.20	4.74±0.53
硼酸 2#	≤0.32	≤0.27	1.47±0.20	≤25.92	≤66.42	5.56±0.74
硼酸 3#	≤0.30	≤0.23	1.44±0.16	≤24.30	≤56.58	5.44±0.62
硼酸 4#	≤0.28	≤0.21	1.42±0.16	≤22.68	≤51.66	5.37±0.61
硼酸 5#	≤0.33	≤0.21	0.90±0.11	≤26.73	≤51.66	3.40±0.42
硼酸 6#	≤0.25	≤0.19	0.39±0.05	≤20.25	≤46.74	1.47±0.20
硼砂 1#	≤0.29	≤0.19	1.78±0.19	≤23.49	≤46.74	6.72±0.73
硼砂 2#	≤0.22	≤0.14	1.87±0.16	≤17.82	≤34.44	7.07±0.61
纯碱 1#	≤0.36	≤0.24	2.15±0.25	≤29.16	≤59.04	8.12±0.95
纯碱 2#	≤0.36	≤0.26	1.77±0.22	≤29.16	≤63.96	6.69±0.83
纯碱 3#	≤0.35	≤0.33	1.58±0.18	≤28.35	≤81.18	5.97±0.62
氢氧化铝 1#	≤0.74	≤0.21	4.56±0.38	≤59.93	≤51.66	17.2±1.44
氢氧化铝 2#	≤0.40	≤0.15	4.12±0.33	≤32.42	≤36.91	15.6±1.25
氢氧化铝 3#	≤0.34	≤0.19	1.55±0.19	≤27.54	≤46.74	5.86±0.71
氢氧化铝 4#	≤0.47	≤0.17	3.48±0.34	≤38.18	≤41.82	13.1±1.29
氢氧化铝 5#	≤0.55	≤0.70	1.59±0.17	≤44.55	≤49.19	6.01±0.63
氢氧化铝 6#	≤0.21	≤0.10	0.90±0.09	≤17.01	≤24.60	5.15±0.33
精 盐	≤0.19	≤0.16	2.39±0.22	≤15.39	≤39.36	6.97±0.83

对于过渡节玻璃，为了调节膨胀系数，除保证高硼硅玻璃的特点外，可能适当引入 CaO 或者 PbO， 但在原材料中，尽可能少含或不含 K_2O，控制 ^{238}U、^{232}Th 的含量，使得其总量在费用不高的前提下，尽可能地少。但其石英砂的要求就比 GG-17 主体玻璃的石英砂要低些，如选择 2#或 4#石英砂即可。

②从熔炼工艺考虑

首先，按照上述要求所需的原材料，在包装、运输、混料、输送到玻璃熔炼炉的各个环节都必须注意洁净卫生，因为空气中来源于土壤中的 ^{238}U、^{232}Th 再浮尘等因素导致材料中的上述放射性元素超标，同时在熔炼过程中，坩埚的侵蚀、炉膛内渣物在高温下的混入以及作业过程中导致其它材料进入玻璃熔体

内，导致放射性元素的超标。这样，对于大宗产品的 GG-17 玻壳主体，除在原材料选择方面要注重严格限制上述放射性的含量外，还要确保熔炼工艺的全过程不能因为某些细节的不注意而导致放射性本底超标。只有兼顾两个方面，才能得到超低本底的 GG-17 玻壳。

5.5.4 微通道板收集效率不均匀的风险

由于 MCP-PMT 探测效率（DE）=阴极量子效率（QE）×MCP 收集效率（CE），如图 5-19 所示，我们可以通过转移阴极，使得阴极的量子效率均匀性非常好，即 QE（R，θ，φ）=常数

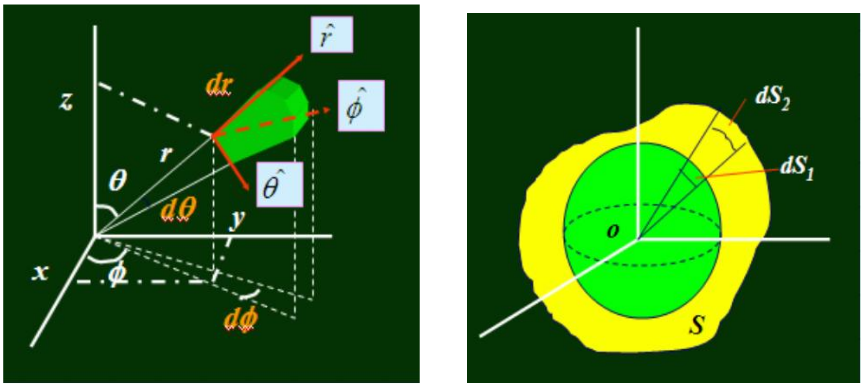


图 5-19. 球坐标系下，QE（R, θ，φ）均匀性

如何制作电子光学系统以及选取合适的 MCP，确保 CE（R，θ，φ）基本不随 θ 和 φ 而变化？从而保证最终确保 DE（R，θ，φ）也基本不随 θ 和 φ 而变化。

由于微通道板对电子的探测效率随入射电子的能量、角度以及微通道板本身的开口面积比、输入电极穿透通道的深度以及 MCP 端面和电极材料的二次电子发射系数等的变化而变化，故要确保 MCP 的收集效率不随入射电子的能量和角度而发生变化，或者变化不大，则应采取如下措施，来逐步解决。

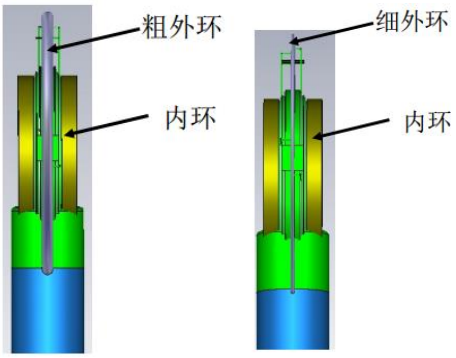


图 5-20. 通过聚焦电极优化探测效率均匀性

优化聚焦电极设计，使得不同位置产生的光电子以近似相同的能量、角度打到 MCP 的通道内，具体措施是：在已有的聚焦电极的基础上，设计辅助电极或者更加有利于来自不同方位的不同能量的光电子，尽可能以相同或相近的能量和角度入射到微通道板的输入端面上。图 5-20 为设计辅助电极解决上述问题的途径之一。通过在原聚焦电极（内环）基础上，增加粗或细外环作为辅助电极，再分别施加合适的电压，使得入射电子以近可能相同的能量和角度入射到 MCP 的输入面上。

（2）优化 MCP 的结构参数，提高 δ，OAR，d，在 MCP 输入端面制作栅网、MCP 输入面制作防离子反馈薄膜（IBF）等措施，配合上述聚焦电极的设计，进一步改善 MCP 的探测效率， 使得其不仅效率高，而且随角度（θ，φ）的依赖关系进一步减少。图 5-21 即是两个例子，其中左图为在输入电极及其微通道板的端面上蒸镀高二次电子发射材料（如 MgO、Al2O3 薄膜等）并在其上安装一个高透过率的金属栅网，而右图则是在 MCP 的输入端蒸镀离子阻挡层薄膜（简称 IBF，是几个纳米 SiO2 或 Al2O3 薄膜等），当然后者将导致收集效率的部分降低，但如提高 MCP 的开口面积比，则可以折中考虑。

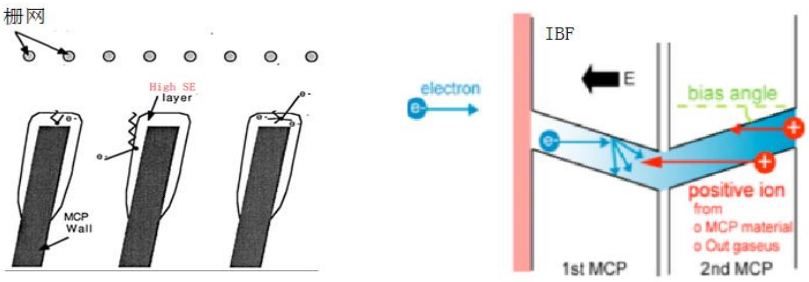


图 5-21. 如何优化单片 MCP 的实例

（3）适当增加两块微通道板间隙电压或提高第二块 MCP 的饱和度，可以有效改善阳极电流的均匀性。

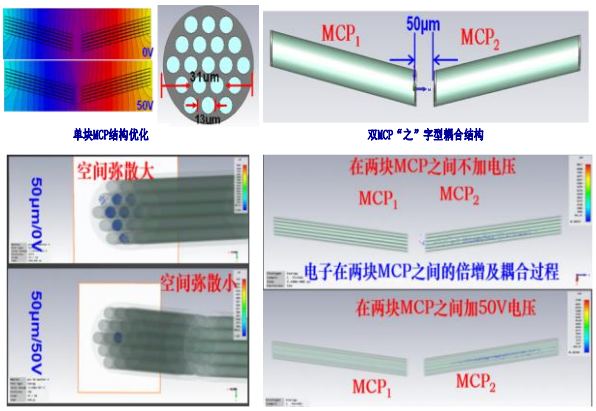


图 5-22. 如何优化 MCP 组件的实例

如图 5-22 所示，提高两 MCP 的间隙电压，进而改变电子束在第二块 MCP 的输入电流密度，再通过改变第二块 MCP 的饱和度，则不论第一块 MCP 由于何种原因导致的增益大小的不同，通过第二块 MCP 的增益对入射电子的流的调节，基本达到同样的输出，这样既可克服由于第一块 MCP 的探测效率的差异导致阳极电流的差异，有利于实现计数模式下的均匀探测。

5.6 chedule & Cost

5.6.1 合作组研制、工程化和批量生产的计划：

	年度目标	年度考核指标	时间节点
2013 年	8 吋样管	量子效率（QE）：≥25%，峰谷比：≥1.5	13 年 12 月 31 日
2014 年	20 吋样管	QE：≥30%，Ｐ／Ｖ：≥２.０，其它指标合格	14 年 12 月 31 日
2015 年	工程化	QE：≥30%，峰谷比：≥1.5，工艺稳定	15 年 12 月 31 日
2016 年	小批量生产	年产达到 15 年指标的 20 吋 PMT 1000 只	16 年 12 月 31 日
2017 年	批量生产	年产达到 15 年指标的 20 吋 PMT 5000 只	17 年 12 月 31 日
2018 年	批量生产	年产达到 15 年指标的 20 吋 PMT 5000 只	当年 12 月 31 日
2019 年	批量生产	年产达到 15 年指标的 20 吋 PMT 5000 只	当年 12 月 31 日

5.6.2 2014 年度计划

2014 年 1 季度	（1） 研制 20 英寸样管专用 MCP，制定相关技术条件； （2） 针对 8 吋 MCP 遗留问题，重点解决阳极信号干扰、阴极均匀性等问题； （3） 20 吋 MCP-PMT 中微通道板及其阳极组件设计评审； （4） 进行高温除气炉、烧氢炉、烘箱、镀膜等设备的安装、调试； （5） 在转移阴极系统中，初步摸索 20 英寸阴极制作工艺； （6） 20 英寸组件设计、加工； （7） 初步摸索铟封工艺； （8）研制 20 英寸球形 MCP-PMT 非转移阴极制作系统。
2014 年 2 季度	（1） 完成 20 英寸阴极转移激活设备的调试； （2） 验收非转移阴极制作系统；

	（3） 完成样管制作前的各种工艺攻关，如 20 英寸玻壳清洗、20 英寸样管管芯封接、20 英寸样管测试等一系列单项实验； （4） 20 英寸样管的试制； （5） 建立 20 英寸样管的测试平台； （6） 低本底玻壳的吹制及其测试； （7） 进一步优化 8 吋 MCP-PMT 及其工艺； （8） 高量子效率光阴极的工艺研究。
2014 年 3 季度	（1） 采用转移阴极和非转移阴极设备，全面开展 20”MCP-PMT 阴极量子效率和均匀性研究； （2） 在上述基础上，开展优化工艺和综合制管研究； （3） 在经过测试获得低放射性本底的玻壳内全面开展 20”MCP-PMT 的研制工作； （4） 开展高量子效率光阴极的单向研究。
2014 年 4 季度	（1） 完善工艺流程，优化工艺参数； （2） 开展产品和测试标准化的起草工作； （3） 开展寿命实验等可靠性研制工作； （4） 完成达到年度目标要求的 20 吋 MCP-PMT 样管 2 支； （5） 完成研制工作报告等文件。

5.6.3 费用

通过前期研究和工程化的深入，确保成品率在 80％以上，优化工艺，降低成本，把 MCP-PMT 的成本降低到 1.5 万元，售价在 2 万元以内。

第6章 中心探测器刻度系统

6.1 刻度系统设计要求

江门中微子实验的反应堆中微子信号是它在液体闪烁体探测器中的IBD正电子能谱。中微子质量排序的评估和中微子振荡参数（）的测量都需要对能谱进行精确测量以提取其中的大气及太阳振荡频率及大气振荡频率对能量的微弱依赖。不同的独立研究表明，为了达到对质量排序的合理敏感度和对精确测量中微子振荡参数的要求，江门探测器的能量分辨率需要达到<3%/√MeV)的要求，而绝对能量非线性需要达到<1%的程度。根据大亚湾的经验，液体闪烁体探测器的非线性主要由液闪的能量猝灭效应和电子学的非线性造成。由于FADC技术的普及，电子学系统的非线性可以得到有效的控制和测量。但是由于对所使用的闪烁体的强烈依赖和测量系统的误差，猝灭效应的评估则有不完全一致的结论，包括对于粒子种类的依赖以及对于切仑科夫贡献的比例的理解等等。对于非线性的控制最为直接可靠的手段是对正电子信号在江门探测器中的直接刻度。液体闪烁体探测器的能量分辨率有两个主导因素：液闪的光子产额和探测器响应的非均匀性。这两种效应可以通过已知能量的刻度源来可靠评估。原则上讲如果液闪在球型探测器内均匀分布，影响能量非线性的是液闪的基本物理性质（能量、粒子相关），而影响位置非均匀性的是探测器的几何和相关部件的光学性质。可是在现实的探测器里，这两种效应往往是耦合在一起的，比如大亚湾实验手动刻度数据就清楚地表明同物理事件位置相关的能量非线性。另外，对于一个直径35米，重2万吨级探测器，绝对液体均匀性是不可能的。比如由于温度梯度的存在，不同位置液闪的发光效率会不同。由密度梯度造成中子俘获时间随位置的变化在KamLAND实验中就有体现。表面上看来，这些效应仅仅会影响能量分辨率，降低实验的灵敏度。实际上这些系统（systematic）的不均匀性会造成高阶的能量非线性，进而可能造成对非线性响应的错误刻度导致错误的质量排序结果。

为了达到江门项目对中微子质量排序和振荡参数精确测量的科学目标，刻度系统需要达到基本要求是能够对探测器内部的不同位置、用不同能量（和光强）和不同粒子的刻度源进行刻度。具体刻度工作如下表所示，有的刻度工作需要经常性的测量，有些工作则整个实验只需要个别次，我们在表中已经区分。

刻度目标	方法	要求
定期测量光电管增益	低光强光源放置到探测器中心	定期，低光强，自动
定期刻度光产额（energy scale）	放射源至探测器中心	定期，自动
刻度光电管和电子学时间延时和	光源放置到探测器中心	可设为定期，不同光强的扫描

global/local timing walk，光电管对光强的非线性刻度		
刻度探测器内液体的光学性质	放射源至探测器内不同位置	定期但仅仅少量优化的位置
刻度探测器能量响应和分辨率随位置的不均匀性	同上	非定期，但根据非均匀性的多少和变化可能需要多次。根据分析结果可能需要采取较密集的位置扫描。同天然放射性和宇宙线引发本底比较。
探测器对中子响应（俘获时间等）随位置的不均匀性	中子源至探测器内不同位置	同上，同闪裂中子比较
刻度探测器能量响应的非线性	多个放射源至探测器中心	可以对2-3种源设为定期。同天然放射性和宇宙线引发本底比较。
目标同上	单一能量正电子至探测器中心和中心轴线的其它可能位置	非定期，根据非线性的精确度可能需要多次。
刻度探测器能量响应与位置相关的非线性	多个源，多个位置（类似大亚湾PuC源的手动刻度）	位置上密集扫描，整个实验1-2次，同天然放射性和宇宙线引发本底比较
探测器边缘效应	同上	取探测器外围位置密集扫描，整个实验1-2次，，同天然放射性和宇宙线引发本底比较
目标同上	预埋透明导管系统。根据需要可以使用多种源沿预埋导管各段进行边缘效应刻度。	同上

根据以上刻度需求，由此我们得出的设计要求为:

1) 为了完成定期常规的刻度，主要的刻度系统应该被设计成自动装置，遵循简单和安全的大原则。该系统应该完成沿竖直方向将光源或是放射源放置到探测器内的不同位置（类似大亚湾ACU）。

2) 为了可以更好的限制位置非均匀性，刻度系统应当尽量自动完成通过中心轴特定半圆内大部分位置的扫描（类似SNO）。

3）考虑类似与KamLAND,BOREXINO和大亚湾“4-pi”系统的装置，以满足将放射源放置到探测器内的大部分位置。

4）要求控制放射源在探测器内部位置至10厘米量级。

5）选择多个gamma放射源覆盖1-10MeV能量段（中微子能谱范围）。

6）考虑使用beta、正电子、以及alpha源对液闪对带电粒子进行直接刻度。

7）考虑类似Super-K实验中的电子枪系统，采用供给稳定的单能正电子的加速器，精确刻度液闪对正电子的能量非线性。

8）采用较发光二极管更加稳定的脉冲激光和光纤耦合的方案，UV激光可以激发LAB产生同带电粒子发光相似的光脉冲，将优先考虑使用。

综合上述的要求和考虑，从刻度源的选择和实现系统的机械设计角度，我们考虑了以下四种刻度系统：

1）悬线扫描式放射源刻度系统
2）微型潜艇放射源刻度系统
3）预埋导管系统
4）正电子加速器刻度系统

6.2 放射源刻度系统概念设计

刻度源直径小于 10mm，长小于 20mm，为了把刻度源放置到任何位置，有两种实现方式，一种是悬线扫描式，第二种是微型潜艇携带刻度源扫描。二者互为备份，在发生意外时，微型潜艇具有一定的侦察与救援功能。刻度源采用超声波定位，工作频率 150KHz，定位精度 10cm，每秒定位一次。

6.2.1 悬线扫描方案

如图 23 所示，分别控制 A 线与 B 线的长度，即可控制刻度源的位置，线的悬挂点一个在正上方即北极点，另一个在北纬 30 度附近。仅靠北极悬挂点就可完成中轴线全部位置的扫描，其驱动装置与大亚湾中微子实验一样，可完全复制；如果北极点与北纬 30 度的悬挂点同时使用，可以获得接近 90%的半圆面的覆盖率；如果北纬 30 度布置 8 个悬挂点，相邻的两点与北极点联合使用，即三点悬挂，可进行体扫描，三维覆盖率可达 78%，如图 24 所示。

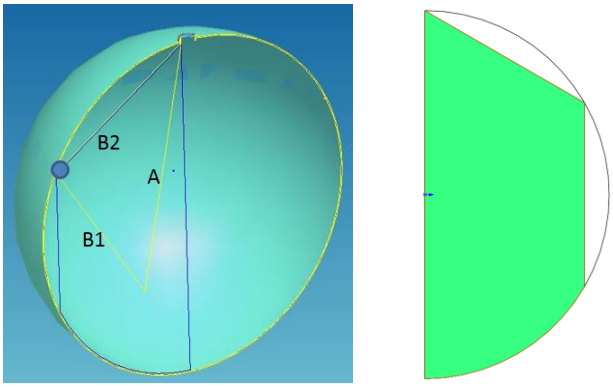


图 23 悬线扫描方案及平面扫描覆盖范围示意图

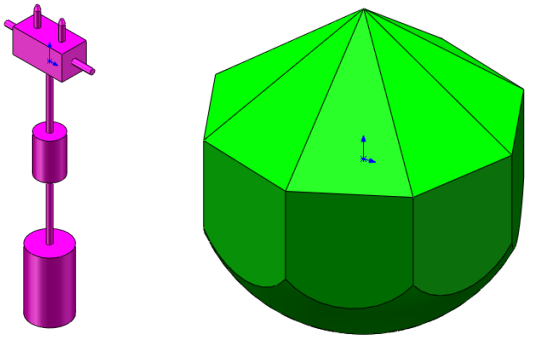


图 24 三点悬挂刻度源于三维扫描覆盖范围示意图

6.2.2 微型潜艇

微型潜艇为椭球型，水平截面为圆形，直径约 300mm，竖直方向截面长轴长度约 500mm，泵喷推进，无外部螺旋桨，所以潜艇外部结构简单，对光的遮挡较少。电力、控制信号通过零浮力脐带传送，同时脐带具有故障模式下的救援功能。移动速度 1m/min，定位精度 10cm，携带超声波发生器，可随时定位。放射源悬挂在潜艇的下方，如图 25 所示。携带 CCD 与 LED 照明灯，若有刻度源意外坠落，可用于侦察、救援与打捞，或者日常监测有机玻璃球的安全状态。

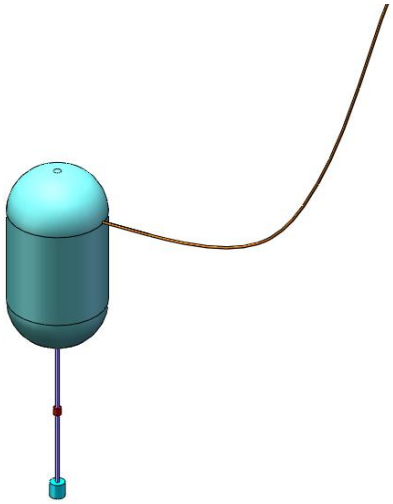


图 25 微型潜艇及其携带的放射源

6.2.3 超声定位

悬线扫描方式虽然可以通过悬线的长度来确定刻度源位置，但 JUNO 这个规模的实验无权威资料可靠，并且潜艇只能携带深度计，无法用其他高精度传感器确认自身的水平位置，故采用超声波定位方式。把刻度源放置到中心探测器内进行刻度时，超声波发生器放置在刻度源附近，接收器安装在中心探测器的有机玻璃球上，由于发射时间已知，3 个不共线的接收器即可确定刻度源位置。

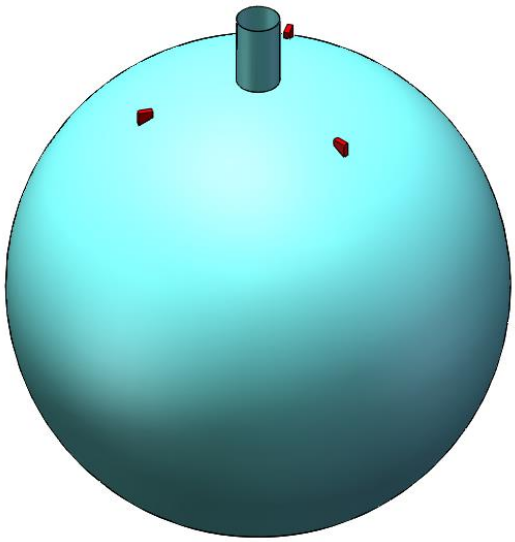


图 26 超声波接收器位置示意图

6.2.4 导管系统

6.3 正电子加速器刻度系统概念设计

6.4 R&D 结果与计划

6.4.1 悬线扫描方案

由于可以参考或者直接使用大亚湾中微子实验刻度系统的驱动装置，因此这部分的研发难点在于自动换源装置，与中心探测器的接口及安装工艺。

考虑到中心探测器现有方案、水屏蔽及 VETO 结构的尺寸，刻度系统悬线扫描装置将安装在内径 1000mm 高 5000mm 的圆柱形有机玻璃筒内，这个尺寸容许悬线扫描装置按 1:1 试制，需要重点考虑的问题有：

- 由于该装置的安装时间在中心探测器做完清洁工作之后，甚至是液闪加注之后，所以安装工作必须简单快捷，以尽量减少带入污染物；
- 如此庞大的有机玻璃结构史无前例，不能对安装精度及时间稳定性有过高要求，对这个筒体结构的形变要有很强的适应性；
- 换源装置的可靠性，寿命试验，破坏性试验

6.4.2 微型潜艇

目前找到三个可能的合作伙伴，上海交大水下工程研究所、西北工大航海学院、哈尔滨工程大学深海工程技术研究中心，都有很强的研发队伍与类似经验，不存在很大技术挑战。为了获得较好的物理结果，需要优化潜艇的尺寸与形状。

潜艇携带深度计，能够获得竖直方向的高精度位置信息，为超声波定位提供校准数据，或者作为超声波定位装置的不完全备份。由于 JUNO 实验的特殊性，需要研究深度计与液闪材料的兼容性。

6.4.3 超声定位

超声波发生器直径约 30mm，工作频率 150kHz，发射脉宽 1ms，发射功率低于 1W，不存在散热问题。所以在刻度源或者潜艇上固定都可以。

超声波接收器阵列固定在有机玻璃球上，3 个接收器就能实现 3 维定位，为了提高可靠性，采用 12 个接收器，在某些接收器发生故障时整个系统仍能正常

工作。增加阵列基线长度有助于提高定位精度，即单从定位角度考虑，希望把接收器安装在中心探测器赤道附近，但这样会增加信号线缆在液闪或者水中的长度，意味着更多的未知风险。

如果接收器安装在有机玻璃球外部，超声传播途径中会增加两个固液界面，极大衰减超声波强度或者产生严重的折射现象，影响定位精度。如果安装在内部，信号线缆与液闪的兼容性及可靠性存在技术挑战，穿越有机玻璃的线缆接插件可能引起应力集中，影响中心探测器的安全。

与海洋半无限大环境不同，JUNO 为封闭环境，可能存在较严重的声反射与折射现象。

超声波定位方面需要研究的问题有：

- 接收器的安装数量与位置；
- 研究固液界面及有机玻璃对超声传播性能影响，尽量将接收器安装在球外部；
- 超声信号的传播途径与噪声抑制
- 超声器件的封装问题，以与液闪兼容

6.5 加工制造安装

6.6 可靠性分析

由于 JUNO 实验方案觉得了刻度系统在整个寿命周期难以维修，所以对刻度系统的可靠性有极为苛刻的需求，尤其是刻度源不得丢失。

在悬线扫描系统的自动换源装置上，采用了多重保护措施：

1. 机械手动作后测量动作位置与夹持力；
2. 机械手或其他夹持装置设计为常闭模式，在失去动力或控制时无法动作，具有固有安全性；
3. 快速接头硬件保护，联接之后通过拉力测试方；
4. 在自动换源装置下方设计防坠落挡板，在进行换源操作时挡板关闭，防止刻度源坠入中心探测器；
5. 刻度源的配重内有软铁，在万一坠落时可通过微型潜艇携带磁体打捞；

微型潜艇的脐带除传输动力、控制信号外，还具有很强的抗拉能力，在潜艇出现故障时，可利用脐带把潜艇拉出中心探测器，除此之外，潜艇设计上考虑到了固有安全性与自检功能。

潜艇的设计平均密度约为烷基苯的 95%，在失去动力或发生其他故障时可自动上浮，同时选择合适的流体运动阻尼，控制最终的上浮速度，防止对有机玻璃球产生过大撞击。潜艇壳体内部维持一定的正压或者负压，时刻检测压力变化，如有大的波动，则表明潜艇发生泄漏，会及时发出报警信号。

6.7 造价与进度安排

6.7.1 子系统造价估算

6.7.1.1 悬线扫描装置

8 个扫描半圆面，总计 9 个驱动模块，每个驱动模块 10 万元（以大亚湾自动刻度模块 ACU 造价估算），计 90 万。自动换源装置 8 个刻度源存放位，8 个悬线固定位，以及防坠落保护挡板，预计 50 万。不锈钢机械封装、手套箱等预计 50 万。

6.7.1.2 微型潜艇

造价 100 万？
由于本子系统相对独立，进度要求较为宽松，2019 年完成

6.7.1.3 超声定位系统

由于本子系统与中心探测器有很多耦合，设计阶段必须考虑好两者之间的接口及安装方式，进度要求较为紧迫。

中心探测器计划 2018 年初开工建设，定位系统必须 2017 年 6 月底完工

4 个超声波发射器、12 个接收器，每个 5 万，计 80 万

软件开发，40 万

6.7.1.4 放射源

10 个 gamma 源按每个 2 万元估算。中子源两枚（AmBe 或是 Cf252）按每枚 5 万元估算。自行研发的五枚 beta、正电子、或是 alpha 源按 2 万元每枚估算。共计 40 万。

6.7.1.5 电子枪

商用定制 50MeV 可调节能量电子枪按 3000 万人民币估算。

6.7.1.6 UV 光源

商用 266 纳米脉冲激光器约 15 万/台。其余光学设备及光纤约合 10 万元。

6.7.2 进度计划

年度	年度目标	年度考核指标	重要任务时间节点
2013 年	形成正式的 Calibration Working Group，开始系统的概念设计，开始模拟计算	形成几个初始的刻度系统机械方案	11 月份之前完成三种机械方案的概念设计。
2014 年	继续设计工作，逐渐形成统一的概念设计，调研工艺。设计光源，并搭建模型	完成关于放射源选取的模拟计算，完成稳定光源的设计方案	6 月之间完成稳定光源设计。6 月前完成三种方案的模拟计算和分析。9 月份从三个方案中筛选两种。
2015 年	小模型的搭建和测试，确定设计方案，完成机械、电子学设计	完成放射源选取所需的 R&D，确定刻度系统放射源	6 月前确定刻度系统机械方案。12 月前完成小模型的搭建和测试。12 月前确定放射源方案，完成
2016 年	招标，购买零部件，开始刻度系统建设工作	完成一个完整的刻度装置，并测试过关	6 月前完成招标，零件购买，12 月前完成一个完整刻度装置、并通过测试。
2017 年	继续刻度系统建设工作	完成剩余工程的 1/2	12 月前完成剩余工程的 1/2
2018 年	完成刻度系统建设工作。购买安装所有放射源。完成和 DAQ 慢控制的接口。	完成剩余工程的 1/2	12 月前完成所有剩余建设项目，完成和 DAQ 慢控制的接口。
2019-2020 年	安装、测试	完成刻度系统的安装和测试工作	在探测器安装结束前完成刻度系统安装

第7章 电子学与触发

7.1 Design goal and specifications

7.1.1 电子学设计指标

江门中微子实验电子学包括中心探测器电子学和反符合探测器电子学两部分。两种探测器均采用光电倍增管（PMT）阵列来进行光子探测。其中，中心探测器的 PMT 数目约为 15000 支，反符合探测器的 PMT 数目约为 1500 支。

光电倍增管电子学系统（以下简称 PMT 电子学系统）主要用来接收 PMT 输出信号，并对其做必要的处理，其基本功能包括：

1) 精确测定每个 PMT 输出的电荷量，以此来确定粒子在液体闪烁体中的能量沉积。这可以帮助我们区分中微子事例，分辨噪声本底，由此推出反中微子能谱。
2) 提供每个 PMT 信号到达的精确时间信息，此信息可以用于探测器内部反中微子事例反应顶点的位置重建，同时可以用来研究本底并本底对实验测量的影响。
3) 为触发判选系统提供实时的信息（总能量信息和 PMT 击中数信息），作为物理事例判选的依据。

PMT 拟采用 20 吋基于 MCP-PMT 结构的 PMT，其增益为 $1x10^7$。对电子学的测量要求为：

1) 电荷测量分为两个量程：信号量程和本底量程。PMT 入射光信号在 1~100p.e.（信号量程）时，电荷量测量分辨从 0.1p.e.到 1p.e.之间线性增加；在测量本底事例（高量程 100-4000p.e.）时，电荷量测量分辨为 1%，（要求信号量程和本底量程有一定的覆盖范围）；
2) 要求信号在 1p.e.时噪声水平不超过 0.1p.e.；
3) 要求在信号量程内实现全波形采样，采样速率约为 1Gsps （800Msps~1Gsps 均有可能，依据物理要求，造价和性能决定最佳测采样频率）；
4) 信号的时间测量精度由波形采样的信号前沿经拟合得出，要求$\sigma t \approx 100ps$。

7.1.2 关键技术问题

根据物理实验的要求以及设计中的光电倍增管预期达到的性能，电子学系统要解决的关键技术问题将包括：

1) 16500 个通道的 1Gsps 波形采样系统的设计；
2) 单通道电荷测量动态范围将达到 4000 倍， 对单光子信号的能量分辨需要达到 0.1p.e.。 这需要低噪音的前端电子学及模数变换设计；
3) 长距离（约 100 米）的高质量模拟信号传输；
4) 水下（或液体闪烁体内）电子学设计；
5) 全数字全局触发系统;
6) 高精度和超低时间抖动的分布式时钟系统的设计；
7) 10Gbps 以上的数字处理及传输系统的设计；
8) 系统的可靠性设计。

7.2 Design (& options)

7.2.1 PMT 电子学设计

7.2.1.1 PMT 电子学总体方案设计

由于 PMT 均安放在水下，因此，根据电子学模数变换电路放置位置的不同，形成了两种设计方案，分别为水上设计方案及水下设计方案，出于对电子学模数变换等部件可更换及不可更换的考虑，水下方案又分为了水下不可更换方案及水下可更换方案。

（一） 水上方案

水上方案的主要特点是尽量将电子学(尤其是模数变换部分)放置在水面之上(或液面，为方便叙述，以下均简称水面）之上，前端不放置电子学或者放置很少量的电子学，通过长信号电缆（80 米左右）将 PMT 输出信号送到水上电子学放大器的输入端。整体方案如图 7-1 所示。

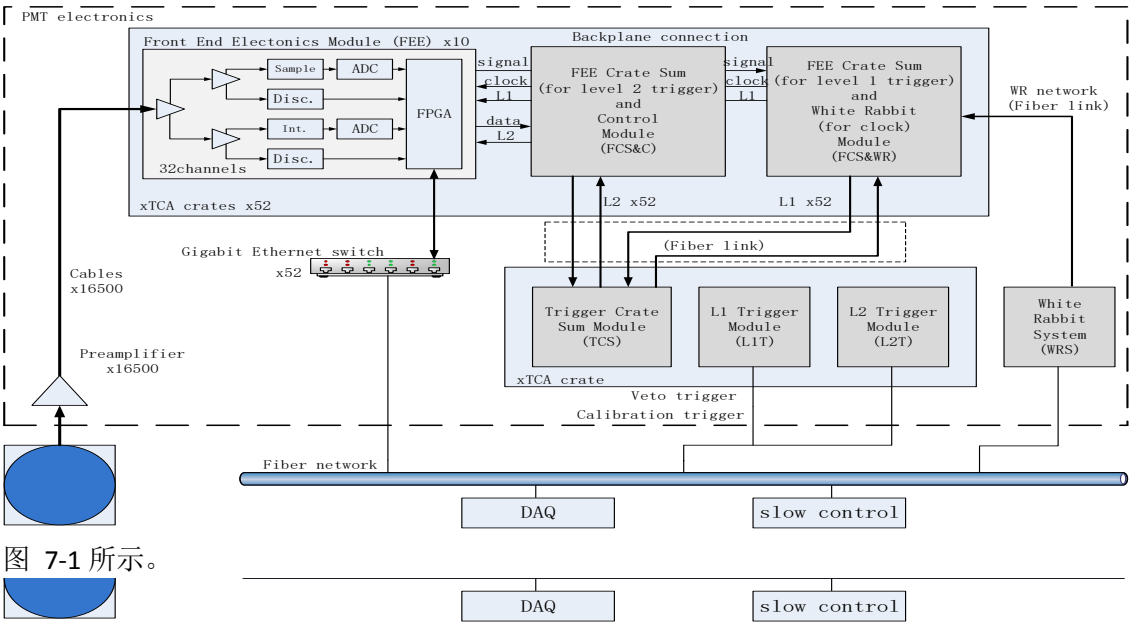


图 7-1 水上方案系统框图

电子学系统将基于 ATCA 规范进行设计，每个机箱中放置十个信号测量插件和两个信号及数据汇总插件。每个信号测量插件可以处理 32 个通道的 PMT 信号，包括信号分量程、信号处理、模数变换、数据处理、触发信号处理、数据汇总和数据传输等部分。

信号测量插件从各个信号通道提取有用的信号信息，通过 ATCA 机箱背板汇总到汇总插件中，再经过光纤汇总到触发判刑机箱。触发判刑完成后，通过光纤将触发信号传回到各个信号处理机箱，并扇出到各个信号测量插件。各个信号测量插件首先将实时数据进行缓存，在收到触发信号后将选中的数据打包并向后端数据获取系统（DAQ）传输。

时钟系统及慢控制拟采用 White Rabbit（“小白兔”传输协议），将所需的时钟信号系统传输到各个信号测量机箱。这样完整的电子学系统与 DAQ、慢控制及时钟系统均采用分布式的

光纤网络系统进行连接。

此方案结构简单，易于实现，但是电缆过长，对信号前沿变慢并产生较大衰减，降低系统性能。

（二） 水下不可更换方案

（将在英文版完成后进行补充）

（三） 水下可更换方案

考虑到水上方案中需要将 PMT 输出信号通过 80 米长的同轴电缆传输到水上的电子学部件，继而采用高速波形采样的方法进行信号处理，这样，一个不可避免的问题是，模拟信号经过如此长的电缆传输后，信号前沿变慢，幅度被衰减，对重建 PMT 输出信号的波形十分不利，从而将影响对物理信息的获取，同时电磁干扰的影响，相对而言这时也会更为突出。缓解这些影响的一个办法是选用相对较粗的低损耗同轴电缆，但由于通道数量太太，这样做的结果，不仅总体造价会明显提升，并且电缆重量和体积也会进一步增加，从而将增加总装方面的难度。为了避免上述一系列问题的产生，将所有模数变换等信号处理模块均放在水中并尽量靠近 PMT，则无论从性能还是从造价上考虑都将是一个比较优选的设计方案。基于这一方案的整体设计考虑如图 7-2 所示。

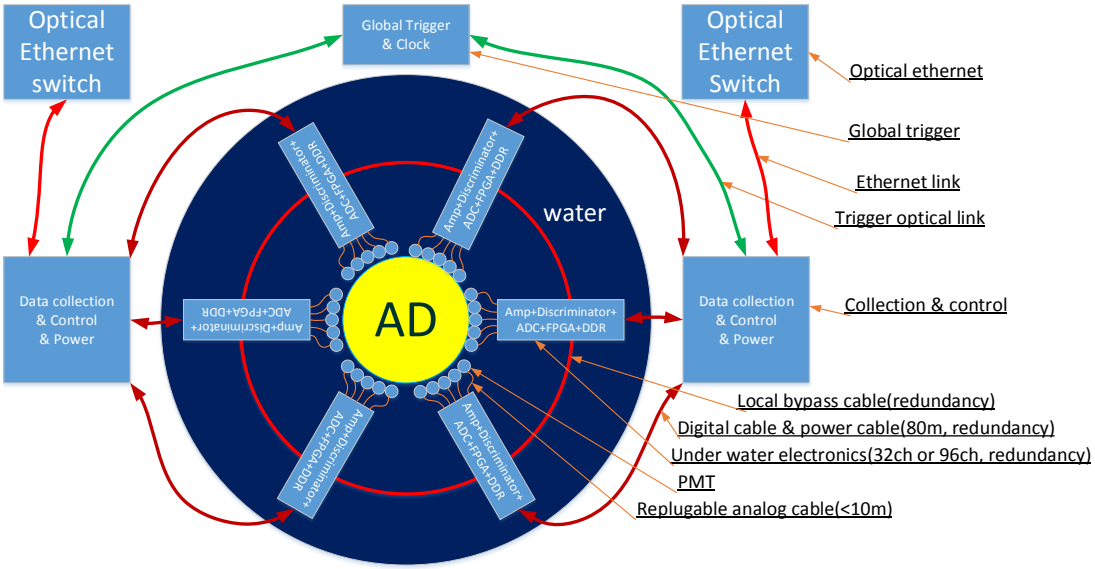


图 7-2 水下可更换系统方案框图

从图中可以看出，该方案是在水中放置若干防水箱，所有信号处理模块，包括信号处理、模数变换、数据处理和数据暂存等一系列处理单元均固定在防水箱中。信号处理模块的前端通过安装在防水箱上的水下可插拔接头、座和不超过 10 米长的电缆与 PMT 连接，以提供在极特殊的情况下进行电子学模块更换的可能性。防水箱的后端通过光电混合电缆连接到水上的电子学系统，水上的电子学系统包括数据采集、控制信号处理、时钟信号处理、全局触发

处理和电源控制等部分。

系统中采用全局触发以降低从水下电子学到水上电子学传输的数据量。为此，在水下进行模数变换后，实时地在获取的数据中提取一些用于触发的特征量，局部汇总后通过光纤传输到水上的电子学机箱，在机箱中进一步汇总后， 通过光纤传输到触发处理机箱（这里可以看出几个方案的触发方案基本上是相同的）。在经过全局触发后，将触发信号通过光纤送回到水下的电子学防水箱。在等待触发的过程中，数据暂存在水下电子学中的存储单元中，接收到触发信号后再将选中的事例数据进行打包后传输出水面。用于传输触发信息和触发信号的光纤可共用，分时传输数据及慢控制信号，并进行冗余设计。

考虑到水中电子学的高可靠性要求，冗余设计可保证水中的每个模块至少与水中的另一个模块保持一对光纤连接，用于传输控制信号。这样在某个光纤模块发生故障时，另一光纤模块可以对其相关电子学进行控制和监测。 这种设计的另一优点是不需要增加长距离的光纤。但缺点是需要在每个水下防水箱上增加一到两个防水光纤接头。

高精度、低抖动时钟信号从水上时钟系统发出，通过光纤传输到水下的每个信号处理模块，并在本地使用去抖动电路，以保证每个通道时钟相位稳定并且抖动小。电源将通过冗余低阻电缆传输到信号处理模块，并进行监测。

数据在经过光纤由水下传输到水上数据汇总插件后，经过包装后通过以太网传输给 DAQ 系统。慢控制和时钟同样通过“小白兔”系统来实现。

为了保证系统在水下部分的高可靠性，冗余设计是必须的，以避免重要失效点出现。

7.2.1.2 放大成形

当采用水下方案时，经过较短电缆传输的 PMT 信号通过放大成形电路后，将被分成两路，一路用作信号甄别，一路与模数变换电路相连用作电荷测量。对水下方案而言，由于 PMT 信号传输距离短，波形形状不会发生明显改变，这时需要选择合适的电路对其进行全带宽处理，以尽量减小因带宽受限带来的损失。如前所述，PMT 信号的动态范围很大（1p.e.~几千甚至上万 p.e.），每路仅采用单个高采样率的 ADC 将无法满足如此大的动态范围的测量要求。因此，设计中将采用两个量程来实现对 PMT 信号的处理。由于绝大部分采样率接近 1Gsps 的 ADC 其满量程输入电压均小于 1V，有的甚至只有 0.5V，因此，放大成形模块，特别是高量程分支的放大成形电路，需要将 PMT 输出信号的幅度转化成适合 ADC 输入电压范围的幅值。鉴于高性能 ADC 均采用差分输入，所以， 放大成形模块还必须将 PMT 的单端信号转换成差分信号以满足 ADC 的输入要求。另外，为了能够达到能量分辨率要求，有效的进行低噪声设计时系统设计需要认真考虑的另一个十分重要的因素。

在水上方案的处理上，因经过长电缆传输后的 PMT 信号的形状将会发生较大的变化，例如，脉冲信号的前后沿会明显变慢，幅度衰减，因此水上方案在控制噪声的前提下，需要考虑使用适当的滤波手段来提高信噪比，并同样采用双量程处理以保证系统的高性能。放大成形模块可以采用商品有源或无源器件搭建，也可采用 ASIC 技术，在一块芯片上集成多通道的放大器和甄别器来实现。

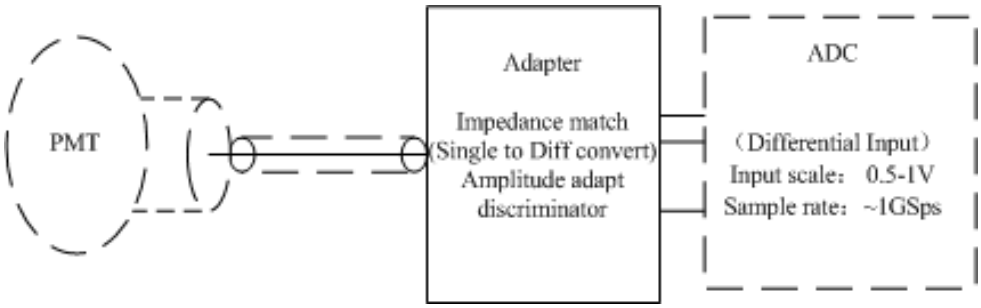


图 7-3 放大成形方案

7.2.1.3 波形数字化

如上所述，根据测量的需求，PMT 输出信号的处理分为两个量程进行。实际 PMT 输出的信号在入射光子为 1p.e.到 100p.e.的时候，输出信号在幅度上呈线性增加，在入射光电子达到某个数值时，PMT 输出开始出现饱和。前期实验表明，当入射光电子数目达到 4000p.e.甚至更多时， PMT 输出基本上完全饱和，波形通过增加宽度来确保波形面积与入射光子的数目相对应，关于波形饱和的细节，需要等 PMT 研发完成后确定。未饱和波形如图 7-4 所示，饱和波形如图 7-5 所示。

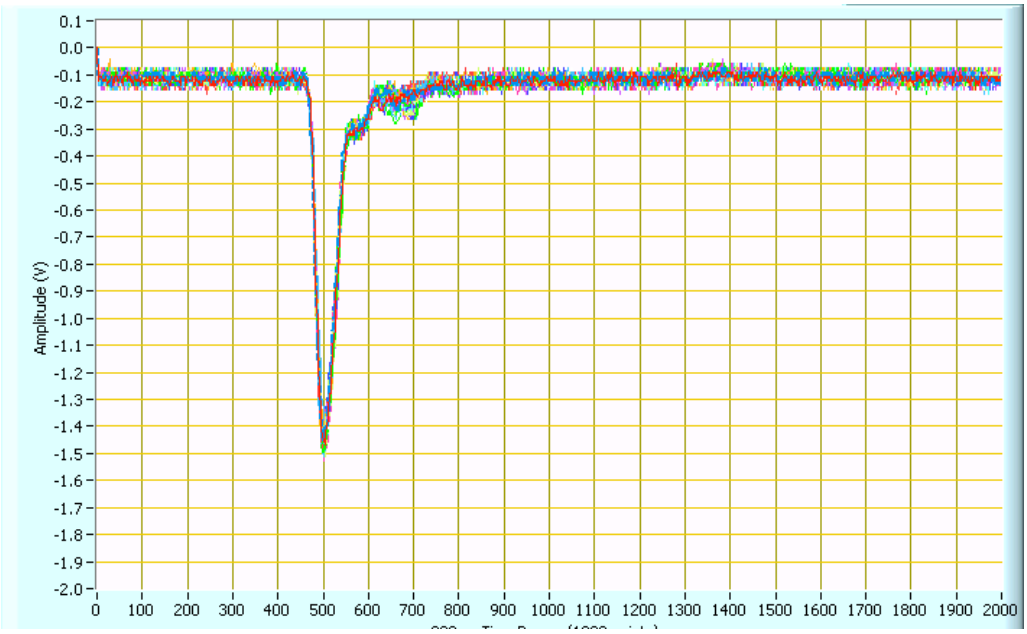


图 7-4 图 PMT 典型的未饱和输出波形

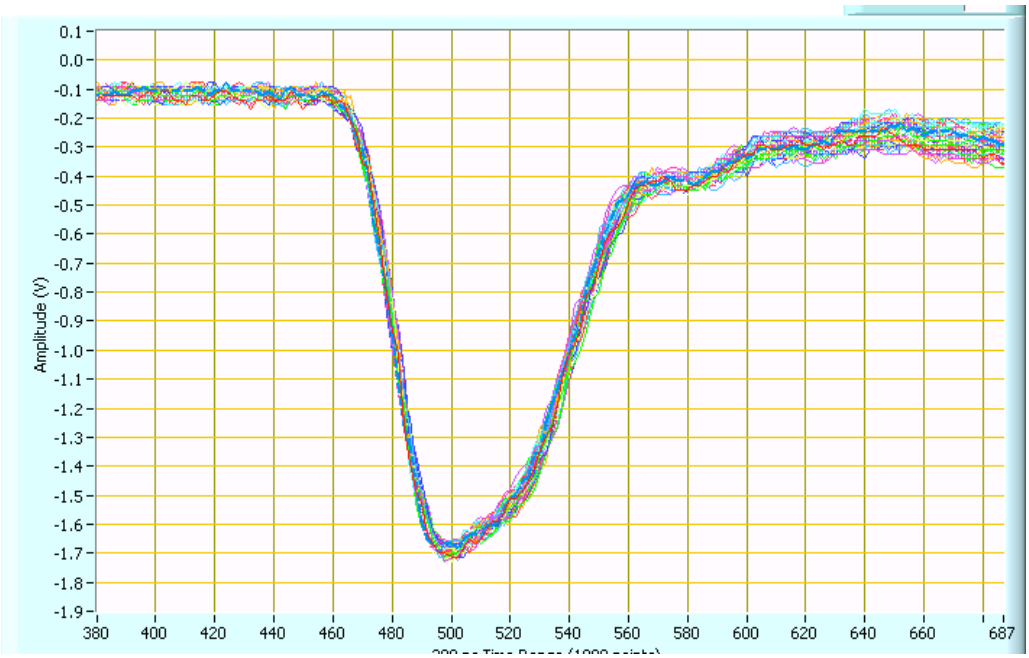


图 7-5 图 PMT 典型的饱和输出波形

目前，用于江门中微子实验的 PMT 还处在预制研究阶段，现按照大亚湾实验使用的 Hamamatsu 公司生产的 R5912 型 PMT 来估算信号幅度，当入射光子为 1p.e.时，PMT 在 50 欧姆匹配电阻上的输出电压峰值为 6mV 左右。于是，100p.e.对应约 600mV 左右。 而饱和时，这一输出电压高达 4V 左右。

在单光子测量时，电荷分辨需要保证 0.1p.e，对应幅度为 0.6mV，理论上讲，对于 0.1p.e..的分辨率， 电子学系统噪声应控制在小于 0.1p.e./2.35=0.043p.e.的水平，对应的噪声电压σ值为 0.6mV/2.35=0.26mV。 因此， ADC 的最低有效位不应大于 0.26mV × $\sqrt{12}$ = 0.9mV。

ADC 设计时，低端测量需要覆盖 1~100p.e.的动态范围，对应 0.9mV~600mV 的电压峰值范围。ADC 拟采用 12 位标称有效位，真实有效位预期大于 9 位，若以 9 位计，按实际最低有效位为 0.9mV 的情况计算，则 12 位 ADC 的最低有效位预计为 0.9mV/8=0.1125mV，电压覆盖范围则为 0.1125mV ~ 460.8mV。由于不能完全覆盖 1~100p.e.的量程，因此在低端需要采用双量程来设计，低端测量要求在 1p.e.~100p.e.的时候分辨线性增加，可以计算出在 400mV 时所要求的分辨为$0.1\text{pe}+\frac{(400mV-0.9mV)\times(1p.e.-0.1p.e.)}{(600mV-0.9mV)}$=0.7p.e.。对应的峰值幅度为 4.2mV，因此相应的 ADC 真实最低有效位为：4.2mV× $\sqrt{12}$/2.35 =6.2mV，此时 ADC 所能覆盖的电压幅度范围为 6.2mV~3170mV，所对应的最大测量电子数为 529p.e.。考虑到 PMT 饱和时，最大输出电压对应为 4V， 因此仍需要更高量程的测量，即测量的高端。从物理测量所感兴趣的电荷范围考虑，超过 529p.e.只需要知道电荷量，不需要波形信息，因此，可以把信号成形为慢信号后用速率稍低的 ADC 采样，以在保证大信号的测量范围及精度的前提下降低成本。

表 7-1ADC 性能需求估算表

量程	低端量程 1	低端量程 2	高端量程
光电子范围（p.e.）	1p.e. ~ 67p.e.	1p.e. ~ 529p.e.	1p.e. ~4000p.e.
信号峰值范围（mV）	6mV ~ 402mV	6mV ~ 3170mV	6mV ~ 4000mV
归一化 ADC 真实有效位	0.9mV	6.2mV	7.8mV

（mV）			
归一化 ADC 最低有效位（mV）	0.1125mV	0.775mV	0.975mV
归一化 ADC 量化噪声（mV）	0.26mV	1.79mV	2.25mV
对应的最小分辨（p.e.）	0.1p.e	0.7p.e.	0.8p.e.

时间测量是通过对信号前沿进行拟合后来完成。在线性范围内的信号一般的上升沿经过短电缆后为 3~4ns，因此在采用 1Gsps ADC 进行采样时，可以在前沿采集到 3~4 个点，以此进行前沿拟合后，用斜率最大处的时刻作为信号的到达时间。

电荷测量是对采样后的波形进行拟合后再计算拟合波形的面积来完成的，波形的面积与电荷量具有一定的对应，此对应关系将在后面的研究中确定。

综上所述，通过高速波形采样，不仅可同时获得能量和时间信息，通过对采样波形的进一步分析，还可获得为物理实验所感兴趣的其它重要参量。

7.2.1.4 数据处理及传输

前端波形数字化产生的数据，先经过简单处理，将触发信息传输到触发系统以供触发判选；触发系统给出触发信号之后，需要将有效数据迅速汇总，并整理成为完整的有效事例，最终传输到 DAQ。

（一） 水上方案的数据处理及传输总体结构

水上方案的数据处理及传输将采用 ATCA 机箱结构，如前所述，每个机箱内有 10 块信号处理插件和 2 块触发插件，前端 PMT 信号将直接进入机箱中的信号处理插件。信号处理插件与触发插件之间的数据传输通过机箱背板总线实现。机箱背板总线采用双星结构，每个信号处理插件与每个触发插件之间都有一对点到点的高速串行连接，通过背板总线传输所需的触发信号。触发后的数据将通过以太网协议传输到交换机，最终传输到 DAQ 中。系统框图如图 7-6 所示。

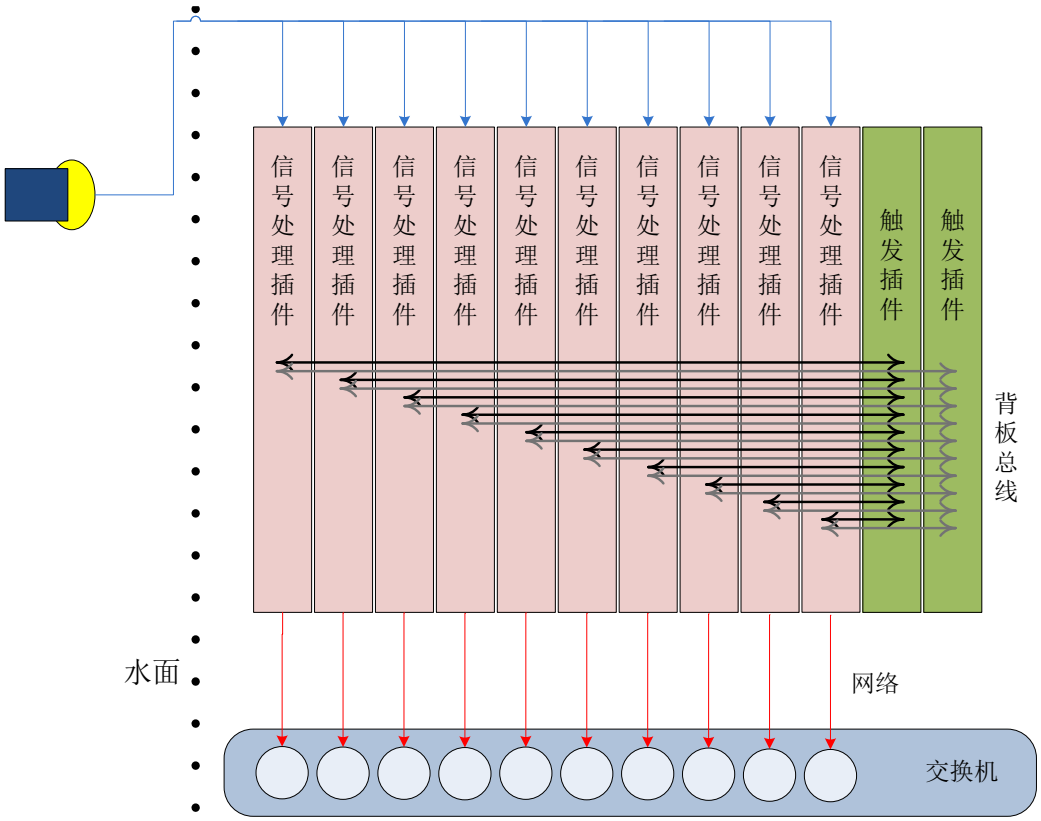


图 7-6 水上方案数据传输及处理总体结构框图

（二） 水下方案的数据处理及传输总体结构

在水下方案中，波形数字化部分放置到水下，数字化之后的数据经过简单处理打包，通过光纤传到水上，而在水上的部分依然采用 ATCA 机箱结构，只是机箱内插件结构较为简单，触发级数可能只有一级。最终的有效数据依然通过以太网传输到交换机。系统框图如图 7-7 所示。

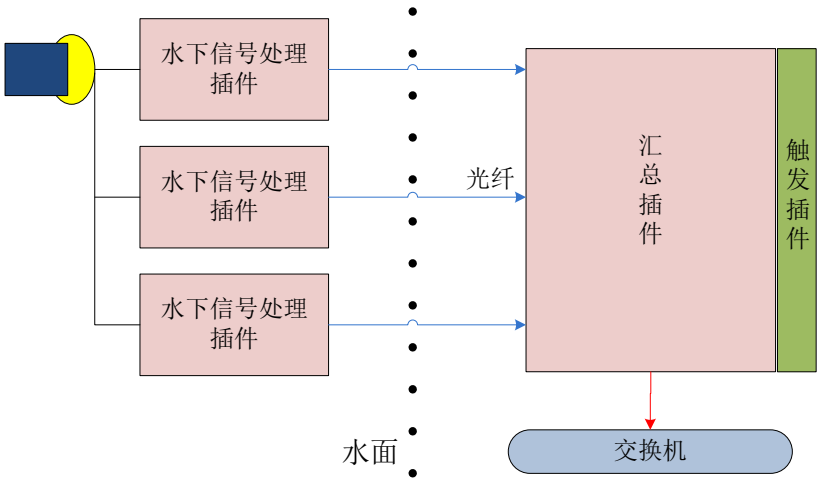


图 7-7 水下方案数据传输及处理总体结构框图

7.2.1.5 触发及时钟系统

江门中微子实验时钟系统需要实现两个主要功能： 1） 为数字电子学提供基准工作时钟，作为波形采样、时间测量和数字逻辑的基准频率；2）为数字电子学提供绝对时间标签，对中心探测器和反符合探测器事例进行时间关联，以及和其他观测实验进行数据比对。根据大亚湾反应堆中微子实验的经验，结合近期国际国内分布式定时技术的新发展，江门中微子实验时钟系统将采用基于 White Rabbit 技术的分布式时钟网络。

White Rabbit 技术由 CERN 和 GSI 于 2008 年共同发起，采用同步以太网技术实现多节点的频率分布，使用精密定时协议实现时间标签同步，并利用全数字双混频鉴相器将同步精度提升到亚纳秒级。该技术可以为江门中微子实验的时钟系统需求提供很好的解决方法：

-同步以太网恢复低抖动时钟可以作为前端电子学的工作时钟。

-通过相位差测量和相位补偿，使所有节点的工作时钟达到亚纳秒相位对齐精度。

-精密定时协议完成前端电子学的时间标签的对齐

-可以接入铷时钟和 GPS 作为外部参考频率和外部参考 UTC 时间

根据经费和实验具体指标要求，电子学有水上和水下两种方案，时钟系统也将存在不同的设计规模：

水上方案：采用机箱级同步的设计方案。（机箱采用 ATCA 结构，每个前端插件处理 32 通道 PMT，每个机箱容纳 12 块前端插件，共需 20000/(32*12) = 53 个机箱，再考虑阻性板室探测器（RPC），刻度系统及其它辅助系统，按照 70 个 WR 节点进行计算）。每个电子学机箱通过时钟插件完成全局时钟和时间标签的恢复，在 ATCA 机箱内，将通过背板的高速时钟信号完成时钟和时间标签的分发，在非 ATCA 机箱内通过面板信号扇出的方式实现该机箱内所有插件的时钟和时间标签信号的分发。

水下方案：White Rabbit 技术的物理介质必须为光缆，而目前仍没有合适的水下光缆的解决方案，从水上到水下部分的链接无法直接采用 White Rabbit 技术来实现频率和时钟同步。这部分可以通过类似 White Rabbit 采用的同步以太网方法，通过物理链路时钟嵌入和恢复实现频率的同步；而时钟同步将通过物理刻度来标定各水下节点的延迟偏差，在离线数据中进行扣除。

7.2.1.6 水下方案中水下电子学工艺

系统结构如图图 7-8 所示，包括 500 个水下密封机箱（C 如图 7-10 所示），如图 7-9 所示，每个水下密封机箱左端通过 32 个接插件 a 连接同轴电缆，右端通过 1 个或多个接插件 B 连接光电混合电缆。密封机箱在纯水环境中，周围没有辐射源，最深处为 40 米。

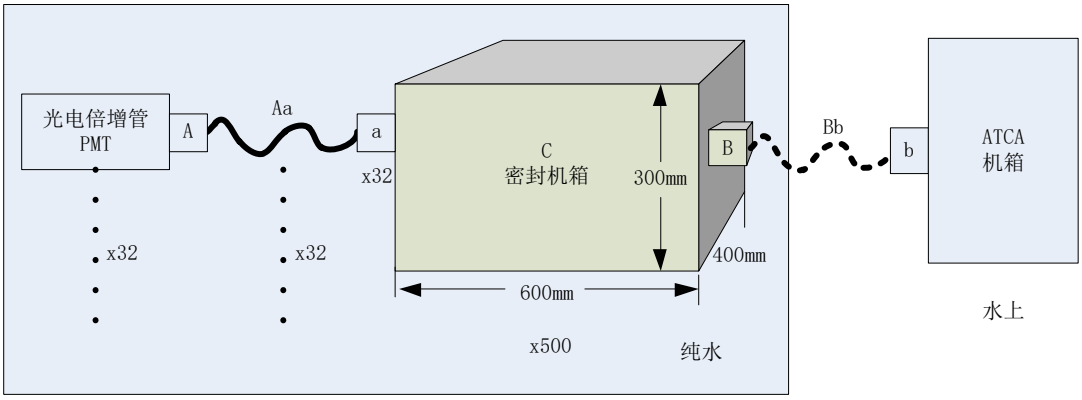
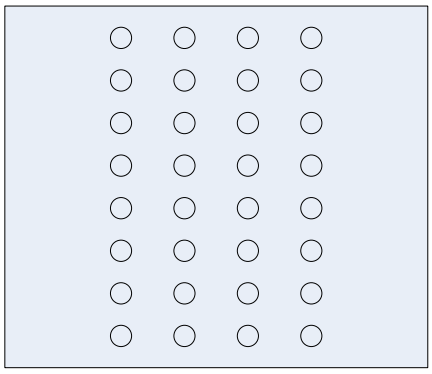


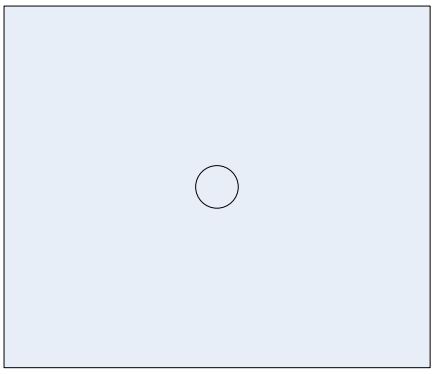
图 7-8 水下密封系统方案

各部分的基本要求：

1. 线缆 Aa 为同轴电缆，10~20 米长，要求 50Ω特征阻抗。
2. 接插件 A 实现水密功能。
3. 接插件 a 实现**湿插拔**功能。
4. 线缆 Bb 为光电混合电缆（光电分立也可以），实现水密功能，100 米长，光纤至少 4 路，电源线至少 4 路（24~48V、10~20A），无阻抗要求。
5. 接插件 B 实现水密功能。
6. 接插件 b 无特殊要求
7. 另：B、Bb 和 b 也可使用普通非水密线缆套波纹管实现。
8. 水下密封机箱从上表面打开。机箱内壁尺寸：600x400x300mm，机箱内壁需提供 PCB/模块安装孔。机箱外壁需提供安装孔。



左侧面板示意图



右侧面板示意图

图 7-9 密封机箱侧板示意图

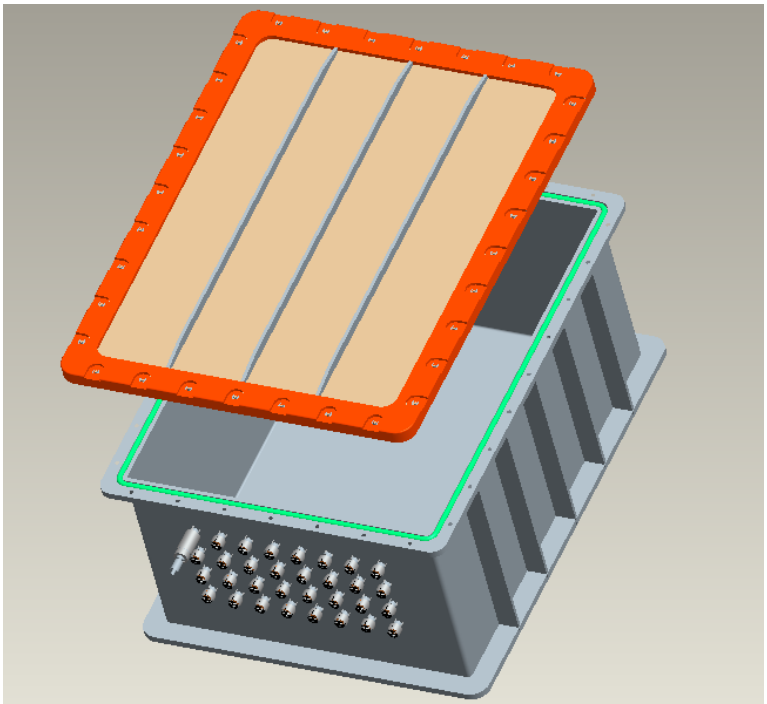


图 7-10 水密机箱外观示意图

7.2.1.7 电源及机箱设计

当采用水下方案时，水下部分将采用特殊研制的防水机箱（即前面所述及的防水箱），水上部分则采用 ATCA 结构的机箱（如图 7-11 所示），其水上部分主要完成三部分工作，即提供电源、接收数据和完成触发功能。

主电源可以采用低电压由水上传输到水下，如+5V，也可以采用高一些的电压如+24V。当采用+5V 传输时，电缆承受的电流相对较大，需要增大线径。但是当采用+24V 传输时，为了采用线性电源由+24V 转换到+5V 所带来的功耗损失，需要在前端使用 DC/DC 进行高效率的电压变换。为了得到较小的纹波，需采用独立电源模块。

无论采用哪种方案，水上的数字部分及触发部分均将考虑按 ATCA 机箱的规范进行设计。如果水下和水上可以使用光纤传输全部信号，则可实现水下电子学部分与水上数字机箱在地回路上的完全隔离。水中电子学的“地”与水上电源“地”，在采用地隔离的 DC/DC 模块后，也就完全实现了地隔离。

ATCA 机箱可以提供很大的数字传输带宽，这使得触发汇总变得十分方便，避免了需要在前面板进行插件数据连接的问题。

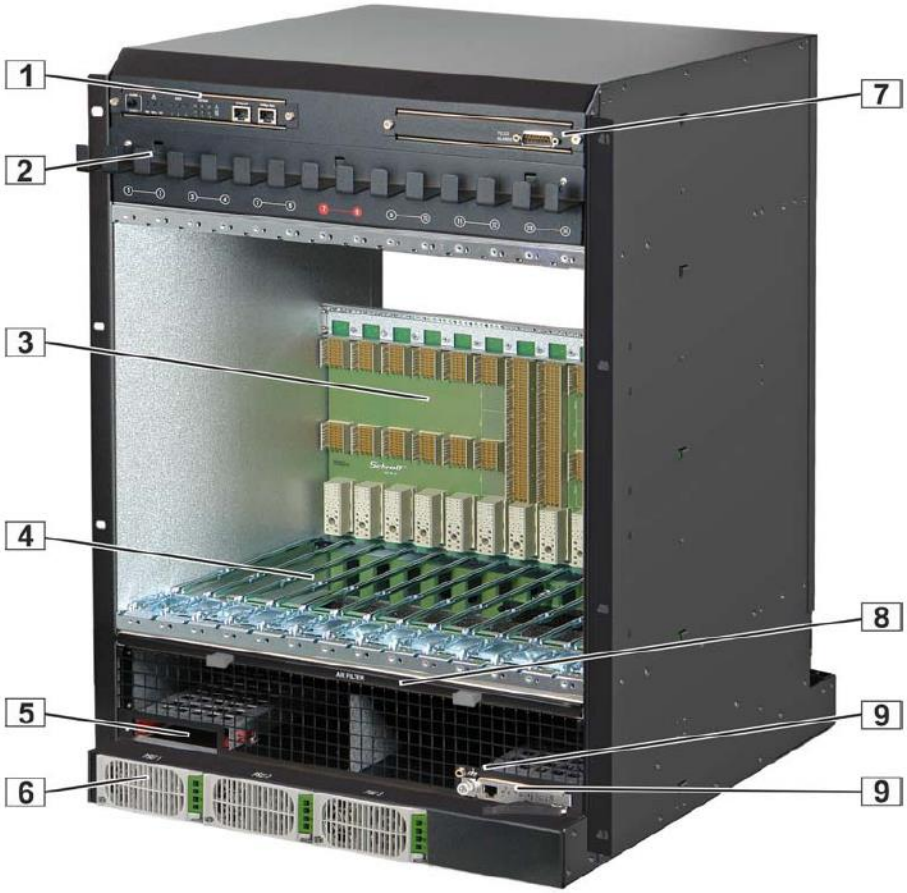


图 7-11 ATCA 机箱

7.2.2 RPC 电子学设计

RPC 电子学系统，作为反符合探测器的主要电子学，用于剔除宇宙线干扰下的中微子事例的读出。大亚湾反应堆中微子实验中，RPC 的信号按 Module 读出，由 Module 前端的 FEC 插件来完成。同时由 FEC 插件完成 32 道信号的模拟数字转换。在 FEC 插件上设计有触发处理的功能，依照本地的触发逻辑给出候选事例的触发信号后完成数据的获取。在外触发（External-Trigger）模式下，多通道的 FEC 信号送入 FIFO，等待全局触发判选系统的信号进行数据选通从而完成数据的读取。

我们计划沿用上述设计思路和方法，参见图 7-12 的系统结构，在此基础上将研制更大规模的 RPC 电子学系统。

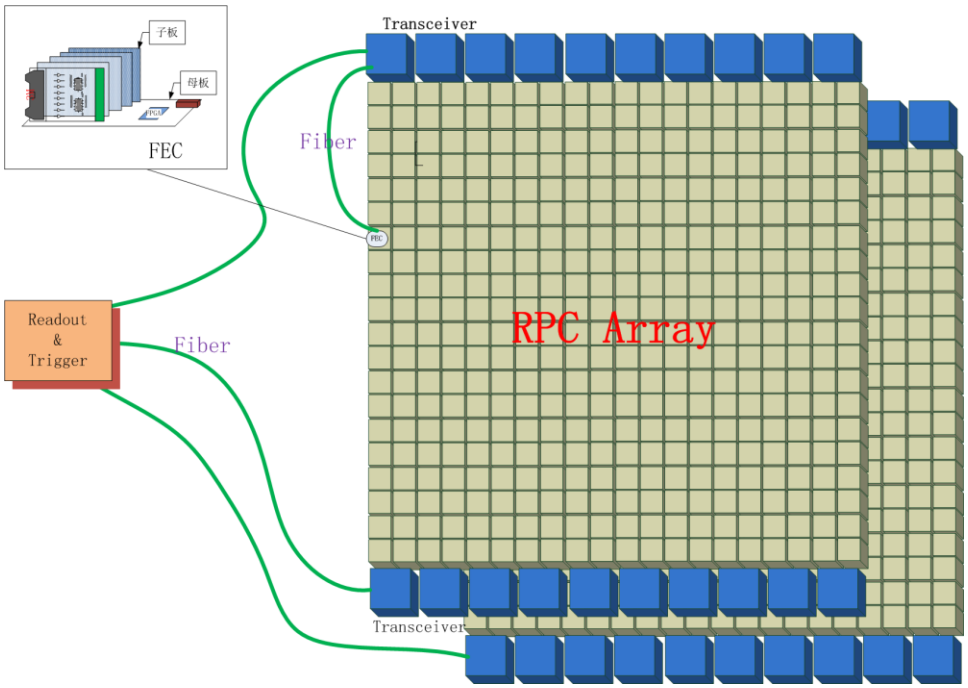


图 7-12 RPC 读出电子学系统结构框图

7.3 R&D planning

7.3.1 PMT 信号特征研究

由于当前江门中微子实验的 PMT 型号尚未确定，因此只能采用现有的滨松 PMT R5912 进行信号特征研究。根据电子学设计需求，需要了解从 1 到 4000 个光电子范围内对应的波形信号。因此设计如下实验，首先验证在增益为 10^7 时，PMT 对应的单光电子入射的输出状态，然后分别以当前单光子态下的信号发生器输出幅度为基准和信号发生器输出幅度的最小刻度值 0.001 V 为步长，逐渐递增加到 4000 个光电子入射的状态，来记录不同状态下的波形。因此根据以上描述，具体将分为以下几个步骤来实现：

1. 确认 PMT 工作在增益为 10^7 状态下，通过获得单光子谱来刻度。单光电子峰与台阶峰的差值，乘以电荷的最小刻度值后除以一个电子的电量，即可得到高压与增益的关系。

因此调整 PMT 的高压，去测量单光子谱来计算对应的 PMT 增益，可以找到 PMT 增益为 10^7 时的工作高压。图 7-13 为未经过长电缆衰减得到的单光子波形（红色）。

2. 逐步递增信号发生器的输出幅度，以便得到不同入射光电子数量条件下的 PMT 输出波形；
3. 对于得到的 PMT 输出波形，利用积分的办法计算对应的电荷量，然后利用直方图得到电荷谱。在光子数较少的时候，通常是小于四个光电子时，一般会同时看到几个峰，但是随着光电子数目逐渐增大，电荷谱呈高斯分布。通过计算此时的峰值，然后减去单光电子峰的台阶峰，得到的结果乘以电荷的最小刻度值后除以一个电子的电量和高压的增益，就可以得到此时对应的光电子数目以及波形和光电子数目的关联性；（建议添加公式描述）

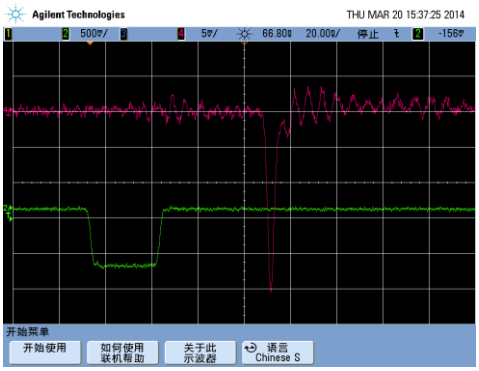


图 7-13 对应单光电子的 PMT 输出波形

7.3.2 放大成形研究

对于三种可选的读出方案，相应的放大成形部分需要进行充分的研究。其研究内容包括：前放电路，量程比值，大动态范围下的 ASIC 设计。预期指标：实现 1-4000pe 的信号测量，噪声 rms 值小于 0.1pe。研究包括六方面内容：

1. 数字及模拟信号的长电缆信号匹配问题；充分考虑耦合电容和电缆、传输线等器件的寄生效应，以求最大程度的减小反射信号带来的影响。
2. 合理分配量程和合适的放大倍数选择问题；整个 PMT 的输出信号动态范围分为 3 个量程—1-67p.e.为一个量程，1~529p.e.为一个量程，1~4000p.e.为一个量程。三个量程之间的增益差别取决于 PMT 或 MCP 的输出动态范围。量程分配时充分考虑不同量程间留有足够的重叠区域。普通光电倍增管的增益差为 10 倍，MCP 的线性动态范围普通 PMT 更大，所以量程间的增益差更大。
3. 缓冲器和放大器的选择及设计问题；挑选大动态范围的商用放大器件，实现实现幅度动态范围大于 1000 的信号放大，实现等效输入端噪声幅度的 rms 值小于光电倍增管或 MCP 输入为 1pe 下的输出对应的幅度。对于 MCP 信号，研究信号限幅放大手段或过载保护措施。
4. 合适的 ADC 驱动放大器的选择及设计。由于 PMT 的信号幅度较大，整个放大通路的增益较小，ADC 驱动放大器的噪声水平也在噪声贡献总占有较大影响，因此 ADC 驱动放大器的噪声水平也应控制在一定水平。研究放大器建立时间等关键性能，使其满足高速采样 ADC 驱动能力要求和信号采样精度要求。

5. 合适的甄别器的选择及设计；实现幅度小于 1/4pe 的信号甄别。
6. 专用集成电路设计；探索研究 16 通道或者 32 通道分量程信号处理集成方法，实现上述的测量和甄别目标。

7.3.3 电缆及水下接插件研究

7.3.3.1 水上方案的电缆研究

本方案中用于模拟信号传输的同轴电缆， 每根长度约为 80 米，共需 2 万根左右。对同轴电缆的要求是信号通过电缆后延迟和衰减较小，电缆可与外部环境兼容且不对整体环境造成影响。

前期对于同轴电缆进行了一些调研和测试分析，具体主要是针对天津 609 厂提供的 3 种电缆进行了测试。相关测试结果如表 7-2 所示：

表 7-2 同轴电缆调研情况表

名称	I 型	II 型	III 型
型号	SYVF -50-3-1	609C5021A	609C5019A
外径	10.5mm	3.5mm	4.5mm
护套	普通护套包裹含氟外皮	聚全氟乙丙烯	聚全氟乙丙烯
100MHz 下衰减（dB/100m）	17.7	15.9	12.3
200MHz 下衰减（dB/100m）	24.8	23.4	17.7
参考价格（元/m)	10	14	18
备注			

从表中可见，III 型电缆在衰减方面的特性最优。此外，进行了护套与工作溶液兼容性测试，结果如图 7-14 所示，从该图中可以看出，II 型和 III 型电缆的性能比较。

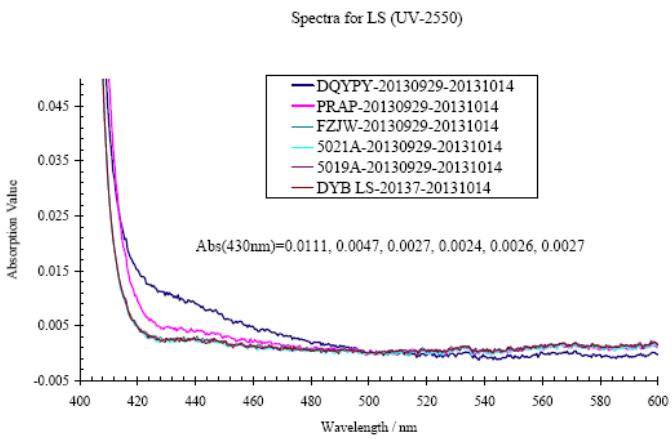


图 7-14 II 型和 III 型电缆性能比较

7.3.3.2 水下可更换方案的电缆与接插件研究

针对这一方案，所需相关部件如下：

1、用于水下的 10~20 米的同轴电缆，要求为氟塑料外皮，数量约 2 万条

2、水下可插拔连接器，如图 7-15 所示（以上海精卫公司产品为例），数量约 2 万套

图 7-15 水下可拔连接器

3、水密箱，数量 500 个

4、光电一体化电缆，进行水下和水上之间的信号传输，数量 500 条。

对于这一方案，目前主要进行的是方案调研和可行性评估，与生产和代理相关器材的厂家进行了联系，包括北京长城电子装备有限公司（6971 厂）、中航光电、上海精卫、杭州滕海等。以上厂家均可提供水密接插件、水密箱，但光电一体化电缆的获得及接插件的表面氟化处理等仍需进行调研。与该方案相关的水密箱的密闭性、信号传输特性以及价格等方面的问题也将作进一步的调研和分析讨论。

7.3.4 ADC 选型及电路设计

为了确保项目的顺利完成，初步进行了对于 ADC 选型的研究。如表 7-3 所示，所选择的范围包括多种商业芯片及自研芯片。

表 7-3 ADC 选型调研表

Type	Model	Sample rate GHz	Channel	Resolution	ENOB
FADC	ADC10D100D	2/1	2	10	9.1
	ADC12D1000	2/1	2	12	9.6
	EV10AQ190A	1.25	4	10	8.6
	ADS5409	0.9	2	12	9.8

	ADS5407	0.5	2	12	10.3
	Stefan's design (ASIC)	1	1	N/A	N/A
	Fule's design (ASIC)	1	1	12	>10
Sampling + ADC	DRS4 + AD9252	1-5	8	11	8(?)
	Weiw's design (ASIC)	1	1	N/A	N/A

针对每种 ADC，将分别设计电路进行评估，掌握各种 ADC 的特性，并在后期的跟进评估中对 ADC 进行筛选。

7.3.5 波形数字化专用集成电路的设计

对探测器信号进行高速全波形采样，是江门中微子实验物理目标对电子学系统提出的核心需求。根据探测器信号特征，需要采用 1Gsps 的采样率，同时保证足够的分辨率和有效位。然而，商用的高速模数变换器，特别是分辨率 12 位、采样率 1Gsps 及以上性能的模数变换器，目前西方对中国大陆地区是禁运的。即使有可能通过中美合作渠道获得，价格也比较昂贵。为了降低电子学单通道的造价，开展基于专用集成电路的波形采样技术研究，是势在必行和有意义的工作。

(一) 高速波形采样专用集成电路的设计

高速波形采样的设计瓶颈在于巨大的数据量，即很难将短时间内集中产生的大量数据在短时间存储下来——在事例率有限的前提下，这通常也是没有必要的，因所存储的信号大部分为基线或本底数据。采用专用集成电路技术所设计的波形采样芯片是基于模拟在线数据压缩和模拟缓存的思想，即首先通过高速采样，将波形信息存储在一块模拟缓存上；当没有触发信号时，表明当前没有真实有效事例，高速采样将一直工作，实现模拟缓存数据的不断更新；当局部触发信号到来时，片上分布式模数变换器可将模拟缓存上的全部信息一次性同步转换成数字信号并存储；之后，立即通过串行读出，将感兴趣时间段的信号快速传输到后端数字逻辑进行处理。这样便实现了高速采样并缓存——模数变换并读出两个步骤在时间上的分离，模拟缓存实际上实现了对有效事例的在线压缩，而模数变换将只选择疑似真实事例进行变换、传输和转存，这样就大大减少了数据处理对后端的压力。

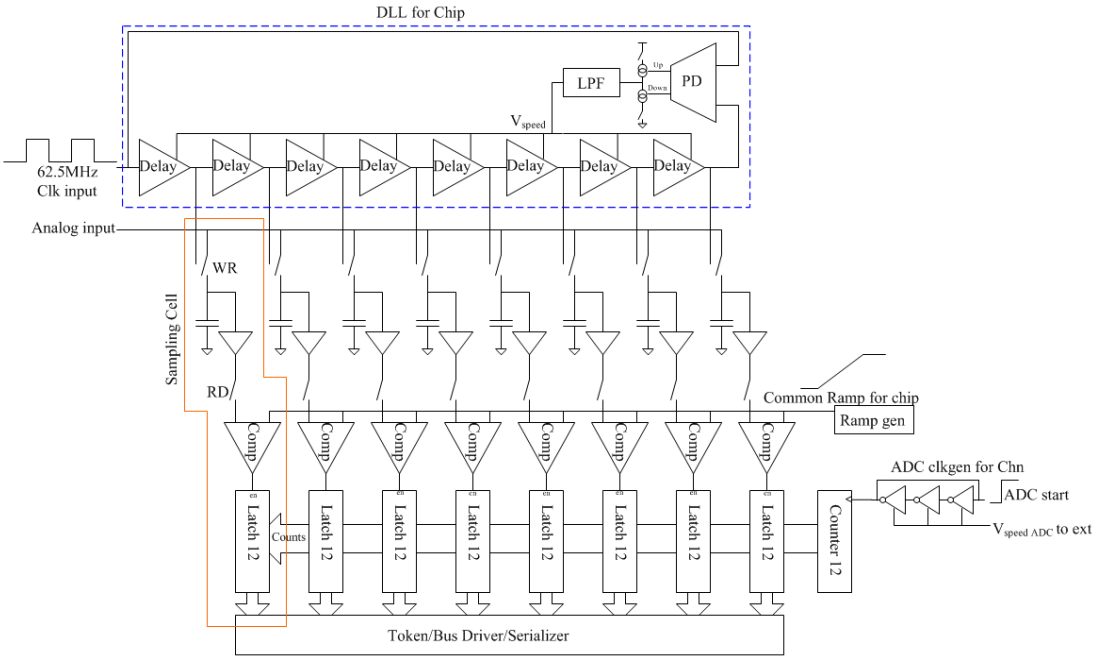


图 7-16 波形采样专用集成电路芯片单通道结构框图

图 7-16 给出了波形采样芯片的结构框图。通过大规模开关电容阵列实现高速波形采样芯片和模拟缓存，无触发信号时，开关电容阵列将持续循环采样，并依次对电容保持信号进行更新；触发信号到来时，各电容上的保持信号将通过各电容独享的比较器，以及全芯片公共的斜坡电压信号进行比较，同时，通过计数器来计算从斜坡电压开始，到比较器给出过阈信号的时间，这样就实现了芯片全部模拟信息的一次性同步变换；将各电容对应比较器的过阈时间记录在对应的锁存器中，待斜坡电压结束后通过串行读出，就实现了数据的传输。

根据物理需求，波形采样芯片计划实现 1Gsps 采样率，12 位分辨率，同时包含 256 个单元的模拟存储深度，并且满足 50kHz 局部触发率的性能指标。

（二）高速模数变换器专用集成电路设计

开展高速模数变换器的自主设计，是高速波形采样的另一个解决方案。该方案基于经典结构，即利用一块高速模数变换芯片对波形进行实时采样，并立即变换成数字数据，然后将数据高速传输到后端系统，进行数据缓存、触发判选等等处理。由于商用芯片的诸多限制，如能实现该高速模数变换器的自主设计和量产，将能大大降低电子学成本。

该高速模数变换器计划采用流水线模数变换器和闪烁型模数变换器的混合型结构。经过输入缓冲和采样保持电路对信号进行采样后，利用四级流水线变换级首先对信号进行高速预变换，之后再利用一级闪烁变换级，对信号进行最终变换和编码。这样就将高速、高增益的压力分散到了多级实现，降低了功耗和面积。芯片预计实现 12 位分辨率，1Gsps 采样率，同时保证 10 位左右的有效位。

7.3.6 数据处理及传输研究

7.3.6.1 主要模块初步设计的考虑

（一）标准 ATCA 插件

信号处理插件将采用子母板结构，子板完成接收 PMT 信号并数字化的任务，母板为标准 ATCA 插件。ATCA 插件作为水上方案中数据传输及处理的主要模块，首先汇总子板数据，通过背板高速总线传输时钟、触发信号，通过千兆网输出到 DAQ，同时完成系统控制，加载，配置的功能，在插件的 FPGA 中将完成部分数字信号的处理和信息的计算提取。插件的结构框图如标准 ATCA 插件结构框图

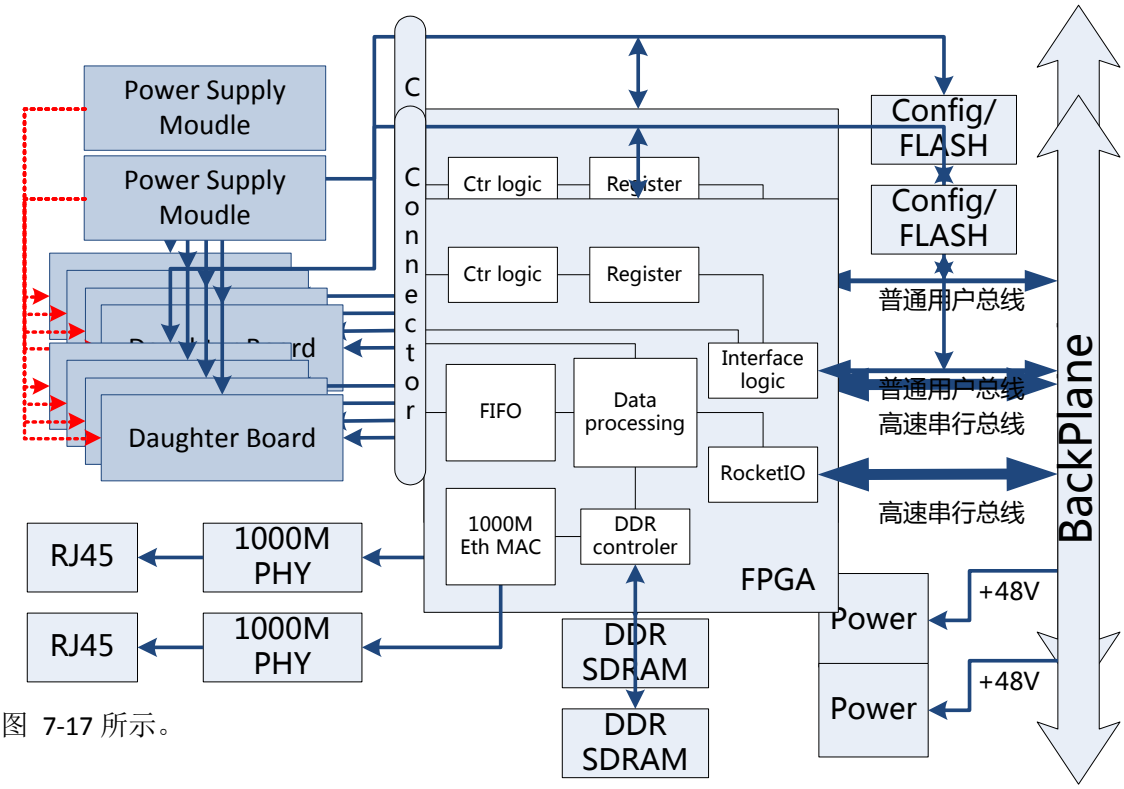


图 7-17 所示。

图 7-17 标准 ATCA 插件结构框图

（二）水下信号处理插件

水下方案中，信号处理插件依然拟采用子母板结构，ADC 子板与水上方案一致，母板将数据打包通过光纤发送到水上。为了保证数据可靠传输到水上，母板将采用冗余设计。两块 FPGA 互为备份，当一块 FPGA 工作不正常时，系统将切换到另一块 FPGA 继续工作。示意图如图 7-18 所示

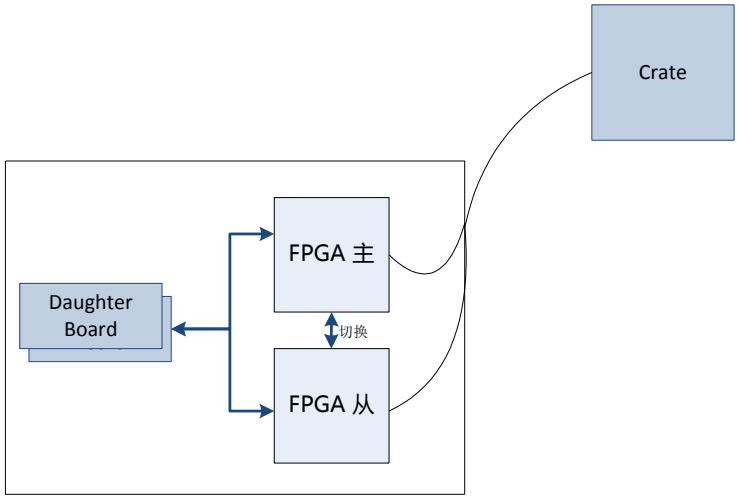


图 7-18 水下信号处理插件示意图

（三）信号汇总插件

水下信号处理插件输出的数据通过光纤传输到水上的机箱中，由信号汇总插件接收，信号汇总插件采用子母板结构，母板可以采用标准 ATCA 插件，子板完成简单的光纤数据汇总的功能，并将数据传输到母板上。

7.3.7 触发及时钟研究

借助大型高海拔空气簇射观测实验 LHAASO 的时钟系统，已经开展了对 White Rabbit 技术的前期学习和研究，实现了带有 WR 定时功能的精简子卡（如图 7-19（左）所示），可以很方便地加载在多种前端电子学板上，为其提供统一的时钟、PPS 信号以及同步的 UTC 时间。前期测试结果表明 WR 交换机和 CUTE-WR 节点的 PPS 信号的偏差的平均值为 100ps，均方根为 21ps（如图 7-19（右）所示）。

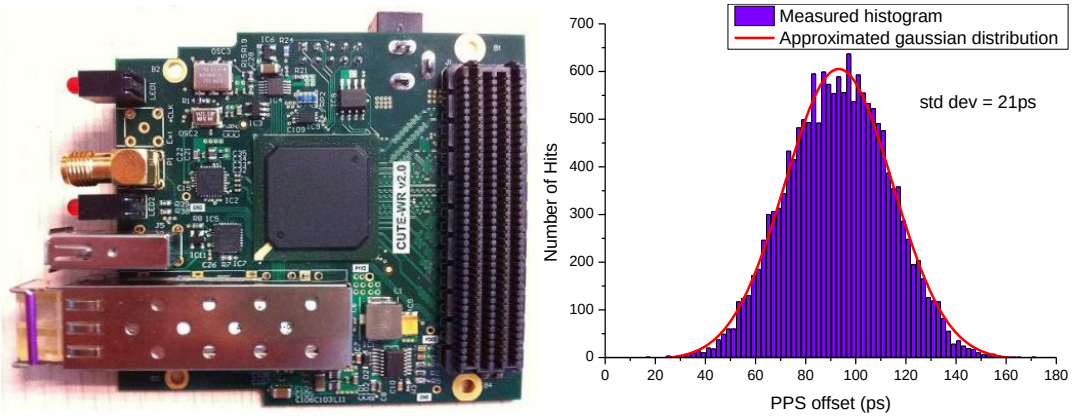


图 7-19 White Rabbit 定时功能精简子卡（左）和 PPS 信号分布（右）

Schedule & Cost

每个 WR 交换机可以提供 15 个下行扩展端口，通过两级共 6 个交换机可以连接最多 75 个电子学机箱。如表 7-4 所示，其造价初步估算为：

表 7-4 WR 造价估算表

项目	单价（元）	数目	小计（万元）	说明
WR 交换机	30000	8 个	24	
WR 节点	3000	80 个	24	
铷时钟和 GPS	80000	2 套	16	
SFP 光模块	800	100 对	8	
光纤			6	
ATCA 时钟插件	8000	60	48	

其它类型时钟插件	6000	20	12	
研发费用			20	
开发测试设备			12	ATCA 机箱，测试计算机，网络交换机等
总计			170	

7.3.8 可靠性研究

按照方案设计，全系统一共 16500 个通道，需要达到 10 年损坏率小于 1%。按照这样的要求，以年计失效率为：$\lambda = \frac{0.01}{10} = 0.001$，以此计算所需要的平均故障间隔时间为 1000 年，每年按照 8764.8 小时计算，因此按小时计的通道失效率需要达到1.14×10^{-7}，属于高可靠性设计范畴。可靠性的设计研究将贯穿全系统的方方面面，包括：不同方案的可靠性分析、系统的可靠性分析、电路设计的可靠性考虑、生产的可靠性管理和整体可靠性措施的建立等等。

7.4 Manufacture & assembly

7.4.1 生产过程

在经过方案设计、原型系统、样机系统和最终方案评审后，再确定方案。之后的工作是批量生产。批量生产包括订货、制板焊接装配和初步检测几个步骤。由于最终生产的通道数目超过 20000，因此生产过程是一个相当长的过程，并且需要各环节实行严格的质量管理和监督。

订货环节的主要工作是按照设计，对元件、器件、电缆、机箱和设备进行订购，由于需要确保可靠性，因此需要对订购的渠道和批次进行严格控制。

制板焊接和装配将交于专业厂家完成，并派人驻厂以对生产过程进行控制，生产过程中进行抽检等措施。

初步检测是指在老化之前对所生产的部件进行检测，筛选出合格的产品进入下一阶段的老化等过程。由于最终需要确保所有通道在实验初期工作完好，因此，需要及时排除有问题的产品。不合格的产品，将进行检查及修理后视情况转为合格产品。

7.4.2 老化

根据产品可靠性的坪曲线，产品在生产的初期的失效率相对较高，经过一段时间使用后，失效率将会降低到最低。因此需要提前进行老化，将有问题的部分挑出，使实验开始时失效率达到最低水平。

在老化之前，需要用一部分产品进行破坏性老化实验，以确定老化方案，并且针对不同

的元器件订购批次，老化的时间及温度均不相同。批量老化是一个相当长的过程，如果一周可以对 1000 个通道进行老化，总体需要 20 周，约五个月，因此，最终需要根据任务时间来确定老化设备的规模。

7.4.3 长时间烤机系统

在老化过程之后，在安装之前，需要进行长时间的系统运行。其目的是进行系统级的调试、进一步筛选、检验老化和在更换相对容易时排除系统中的所有可能问题。

长期系统级烤机需要在实验当地进行，并在前端连接 PMT。实际上相当于在地面搭建了之后的完整电子学系统进行实验。其过程预计需要三到四个月。

7.4.4 安装过程及相关问题

安装的过程需要与探测器的安装相协调。在安装之前，需要将外部测试系统准备好，安装时做到随时安装随时检测。预期的安装是从探测器底部开始，其中需要避免安装时候的部件损失和人员事故。预期安装过程需要六个月到八个月。

在完整安装完成后，需要进行一段时间的系统稳定性调试，进一步确保在完整系统工作时系统达到最佳状态。

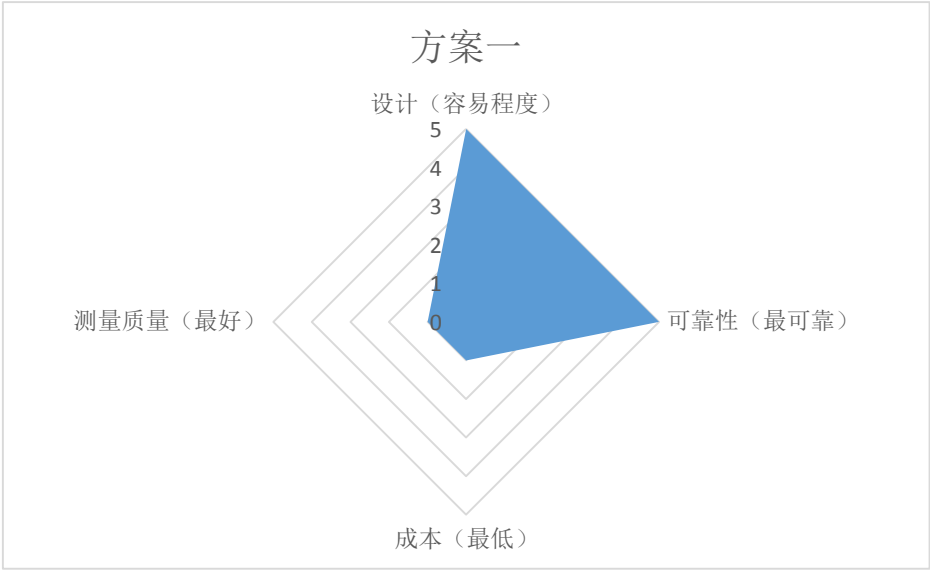
7.4.5 可靠性控制

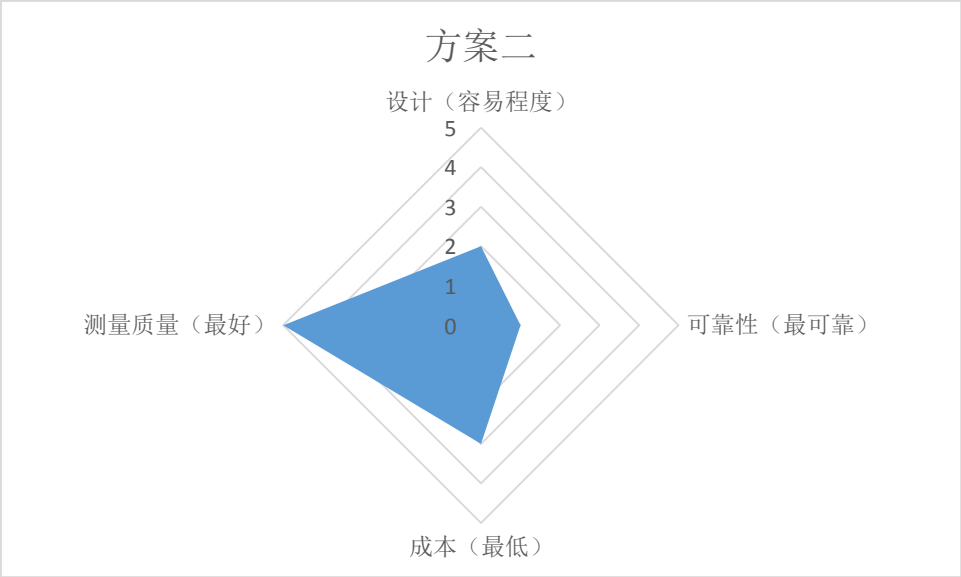
从订购环节开始，到最后的安装，所有的步骤均需要严格的质量管理和控制。需要进行严格的可靠性控制。其目的一方面是确保安装好的系统正常，另一方面也减少生产过程中的损失，将损失消耗降到最低。

7.5 Risk analysis, safety, etc

7.5.1 方案的风险分析

对于这样一个 20000 个通道规模的高速采样系统，由于所有的 PMT 均处于水下的特殊性，从工程角度考虑，方案的确定必然会伴有系统性风险。如图 7-19 所示，方案一将所有电子学放置在水面之上，可以最大程度降低失效更换的风险，但是造成了系统测量和成本控制的风险。方案二将所有电子学放置在水中但是不可更换，降低了系统测量的风险，但是增加了一旦失效而不可更换的风险。方案三设置在水下但保留更换的可能性，将失效更换风险设置在方案一和方案二之间，而同时降低了系统测量的风险，但是成本有可能提高，并且增大了系统设计的风险。最终的方案需要在相应的设计和测试完成后确定。


方案一
设计（容易程度）
5
4
3
2
1
0
可靠性（最可靠）
成本（最低）
测量质量（最好）


方案二
设计（容易程度）
5
4
3
2
1
0
可靠性（最可靠）
成本（最低）
测量质量（最好）

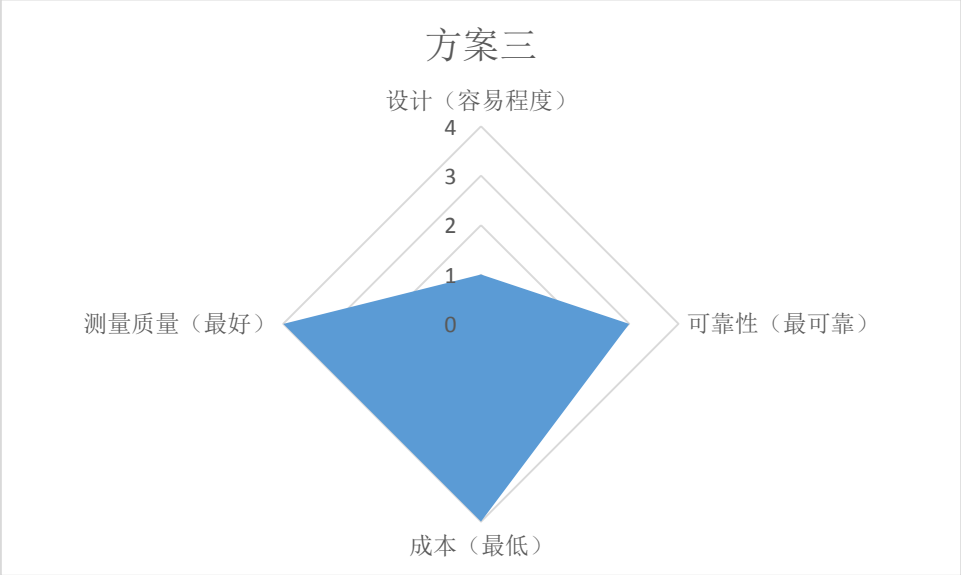

方案三
设计（容易程度）
4
3
2
1
0
可靠性（最可靠）
成本（最低）
测量质量（最好）

图 7-19 方案风险分析

7.5.2 设计的风险分析

设计的风险主要体现在四个方面：信号测量的设计风险、可靠性设计的风险、成本控制的风险和设计完整性的风险。三种风险中，首要风险是信号测量风险，其次是可靠性设计的风险和设计完整性的风险，而可靠性设计风险与成本控制风险相关。

其中，设计完整性的风险很大程度是由两方面造成，一是人员团队，二是对系统的理解。为了避免风险，需要建立足够人员的团队并进行协同设计。

7.5.3 生产的风险分析

生产的风险主要体现在：采购的风险、制板焊接装配的风险、老化测试的风险和成本控制的风险。所有的风险只有通过严格的质量控制体系来避免。

7.5.4 安装的风险分析

安装的风险主要体现在三方面：安装质量风险、安装时间风险和安全风险。同样需要通过严格的管理和质量控制来避免风险。

7.6 Schedule & Cost

7.6.1 时间安排

2013-scheme design

2014-key technique R&D, finish a 32 channels under water electronics demo system for scheme 3

2015-Prototype system for scheme 1, a 200 channels “dry” system will be test at DYB

End of 2015, review for three schemes will be done. Final scheme will be chosen.

2016-Prototype system for the final scheme, about 200 channels

2017-Mass production

2018- Mass production and Installation and testing

2019- Installation and testing

7.6.2 经费概算

第8章 数据获取与探测器控制系统

本章介绍江门中微子实验的数据获取与探测器监控系统，系统概念设计分别介绍如下。

8.1 数据获取系统

数据获取系统（DAQ）主要实现以下功能：
1．从前端电子学设备读取数据。
2．把从各个电子学分支得到的事例片段组装成完整事例。
3．进行在线快速处理以便在线监测和数据压缩。
4．把事例数据存储保存。

8.1.1 系统需求分析与设计目标

8.1.1.1 事例率

江门中微子实验探测器分为中心探测器和反符合探测器两部分，其中反符合探测器又分为水屏蔽契仑柯夫探测器和顶部反符合探测器，一共三个探测器系统。根据探测器的设计方案，中心探测器和水屏蔽探测器采用液闪和水加 PMT 的方案设计，拟采用同样的 PMT 和电子学系统。中心探测器设计大约有 15000 个 PMT，水屏蔽探测器设计大约 1500 个 PMT。顶部反符合探测器有三种待选方案，一种是塑料闪烁体加 PMT 的方案，第二种是液体闪烁体加 PMT 方案，第三种是 RPC 探测器。

根据模拟估计，江门中微子实验的中微子事例每天只有数十个，中心探测器获得的物理事例主要来源于放射性本底。放射性本底主要来源于 PMT 的玻璃和钢罐等钢结构材料，根据模拟计算由放射性本底产生的物理事例率大约有 1MHz。通过不同的机械设计增加屏蔽层可以显著的降低本底事例率，目前有两种结构设计方案：有机玻璃罐钢网架方案和钢管气球方案，均可以把本底事例率降低至 KHz 量级，最后通过触发系统将事例率压低至约 1KHz。水屏蔽探测器主要获取宇宙线 Muon 事例以及岩石环境等本底事例，总的事例率小于 100Hz。

超新星爆发的可引起 1KHz 事例率仅持续约 10 秒钟，每个探测器还需要放射源和 LED 等方式的刻度取数模式，也会产生数百甚至上千 Hz 的事例，不过刻度事例率可以根据实验需要，约定在一个相对合理的范围之内。

8.1.1.2 数据吞吐量估算

PMT 电子学的电荷测量方案计划采用 1GHz 的 FADC（12bit 数据位）波形采样读出，采样窗口计划为 1us，即 1000 个采样点，按照每个采样点占用 16bit（2 个 Byte）估计，添加数据标记及时间信号后（估计为 16Bytes），单个 PMT 信号数据长度将达到 2016Bytes。

数据获取系统的输入数据量根据模拟结果估算如表 8-1 所示，常规取数时，中心探测器平均每个 PMT 的读出数据量约为 140KB/s，总的读出数据量在 2.1GB/s 左右。 中心探测器高能宇宙线事例能量将大于 1 GeV，可使全部 PMT 都着火，估算约为 3Hz。本底和中微子低

能事例由于能量低，平均按照 1000 个 PMT 着火计算，事例率按照 1KHz 估算。水屏蔽探测器着火率按照 10%估计，事例率按照 100Hz 估计，数据量远远小于中心探测器。顶部探测器由于方案不够确定，数据量暂不计算在内。

另外根据表 8-1 估算，超新星爆发时可在约 10s 时间内增加 1KHz 的事例率，基本都是低能事例，平均着火 PMT 个数按照 2000 个估算，平均每个 PMT 的数据量约 411KB/s，读出数据量增加约 4GB/s 达到 6.1GB/s，大约是常规取数的 3 倍。对于探测器刻度取数模式，低能事例按照 500Hz 和 1000 个 PMT 着火估计，高能事例按照 66Hz 和全着火估计，读出数据量将增加 2GB/s（数据量可根据实验要求降低）。如果考虑刻度取数和超新星爆发同时发生的偶然情况，极限数据读出量可达到 8GB/s，是常规取数的 4 倍，数据读出最大带宽要求为 8GB/s。由于超新星爆发的事例率仅持续约 10 秒钟，数据获取系统可将读出的新增数据缓存在计算机的内存当中，延缓处理和存储，系统性能可按照刻度取数需求设计，并不需要特别增加计算和存储设备。刻度取数会维持较长时间，因此数据获取系统处理性能应以满足刻度取数的需求为主，数据处理能力指标达到约 4GB/s 即可满足实际需要。

因此数据获取系统常规取数设计性能指标为处理 2.1GB/s 数据，最大读出能力提高 4 倍至 8GB/s，最大数据处理能力提高 2 倍至 4GB/s。按照 4GB/s 的数据处理能力，如果发生超新星爆发，总的读出缓存，常规取数时需要大于 20GB，刻度取数时需要大于 40GB，全部新增数据分别需要 20 秒和 40 秒完成处理。

表 8-1 数据获取系统数据量估计

<table>
<tr><th></th><th>通道数</th><th>单通道数据长度（Bytes）</th><th>着火nPMT</th><th>触发率（Hz）</th><th colspan="2">数据率（MB/s）</th></tr>
<tr><td>中心探测器（低能事例）</td><td rowspan="5">15000</td><td>100（40ns）/ 2016(1us)</td><td>1000</td><td>1k</td><td>100/2016</td><td rowspan="2">190.72 / 2106.72</td></tr>
<tr><td>中心探测器（高能事例）</td><td>2016(1us)</td><td>15000</td><td>3</td><td>90.72</td></tr>
<tr><td>中心探测器（超新星事例）</td><td>100（40ns）/ 2016 (1us)</td><td>2000</td><td>1k</td><td colspan="2">200/4032</td></tr>
<tr><td>中心探测器（刻度事例）</td><td>100(40ns) / 2016(1us)</td><td>1000~15000</td><td>1k~66</td><td colspan="2">100/2016</td></tr>
<tr><td>水屏蔽探测器</td><td>1500</td><td>100(40ns) /</td><td>10%</td><td>100</td><td colspan="2">1.08/30.24</td></tr>
</table>

		2016 (1us)			
顶部探测器					-
日常合计					192/2137
最大性能					492/8185

由于低能事例的有效信号宽度很小，如表 8-1 所示按照 40ns 有效宽度计算，可对 1us 的波形采样数据进行零压缩，添加时间标记后单通道数据长度也仅为 100Bytes，这可压缩掉约 95%的低能事例波形数据。刻度事例和超新星中微子事例可采用同样的波形压缩方式，经波形压缩后数据组装和存储设计指标为 500MB/s（常规需求为 200MB/s）。如果电子学系统就可以完成波形数据压缩，这将大大降低对数据获取系统的处理性能需求。如果电子学系统不能完成，就必须在数据获取系统内完成波形数据压缩。

8.1.1.3 数据处理需求

数据获取系统需要并行读出某个探测器的所有电子学分支的数据，按照分支进行组织，将同一次触发的所有电子学数据片段进行组装，最后组装形成该探测器的完整事例。中心探测器 15000 路通道，电子学系统按照每 32 个通道组成一个插件，共约 469 个插件，每个插件读出数据量为 4.5MB/s，最大数据量约 18MB/s。每 10 个插件可组成一个机箱，每机箱数据量为 45MB/s，最大数据量 180MB/s。由于数据量大，电子学系统与数据获取系统不再适合北京谱仪 III 和大亚湾中微子实验的 VME 总线接口方式。适合于采用基于网络的方式，电子学系统可以插件为单位发送数据，只需要通过百兆网卡，也可以将机箱内的插件数据汇总后通过前兆网卡发送。水屏蔽探测器 1500 路通道，参照中心探测器电子学设计，可以按照 32 个通道组成一个插件，共约 47 个插件，可以插件为读出分支，也可以多个插件汇总后作为读出分支。

由于前端电子学分支不具备灵活的数据调度发送能力，所有数据获取系统需要先由读出节点从电子学分支读出数据并缓存后才能开始组装，可以分为两级进行组装。首先在读出节点上对多个电子学分支的数据片进行第一级的数据段组装，然后将数据段发送给后端事例组装节点完成第二级事例级的组装。由于电子学读出数据量较大，在存储之前必须进行数据压缩，压缩方法有波形压缩和软件触发等。波形压缩最好从在第一级组装前就开始，这样可以大大降低组装数据量，并减少后端的网络传输量。软件触发可以通过采用 PMT 着火个数以及电荷能量分布情况来完成，也可以进行更复杂的快速事例重建来完成，根据初步估算可期望通过软件触发后，降低常规取数事例率到 100Hz，常规取数数据量可降低至约 100MB/s，如果高能事例数据可以进行部分压缩，比如压缩一半，常规取数数据量可进一步降低为 55MB/s 左右。

不同探测器之间的数据，由于触发系统是相互独立的，在不进行完整重建的情况下，不能在线完成多探测器的联合事例组装，只能进行探测器间事例数据流的合并，并可按照事例触发时间排序。这首先要求对同一探测器内部的事例数据排序，然后再进行不同探测器间事例数据的排序，最后按照排序的顺序，全部存储到文件。经过波形压缩后，系统磁盘存储性

能常规取数需求为 200MB/s，数据存储总容量按照保存一周计算，大概需要 120TB 的有效存储空间。如果保存一个月的数据，则需要 520TB 的存储空间。

8.1.1.4 其他功能性需求

通用分布式数据获取系统需要的运行控制、运行监测、信息共享、并行机制、进程管理、软件配置、参数归档、日志、数据质量监测等等功能性需求，本实验都需要。同时根据本实验特点，还需要考虑远程值班控制和监测等需求。

8.1.2 系统概念设计方案

由于本实验与北京谱仪三和大亚湾一期实验有很多相似之处，可最大化的吸收这两个实验数据获取系统的设计经验，仍然可以采用 ATLAS TDAQ 软件作为软件框架，进行部分软件的复用，主要是通用的控制等服务层软件。但是本实验也有一些不同之处，数据规模增大很多，数据流处理部分需要重新设计和开发。

如图 8-1 为数据获取系统概念架构设计框图，根据探测器和电子学的情况，数据获取系统采用分布式读出方案，读出系统部署在前端电子学机箱内或者后端刀片服务器上，以插件级或者机箱级作为分支进行读出；通过两级事例数据汇集并完成事例数据组装；可通过波形数据压缩和事例筛选处理来降低数据量；然后根据触发时间进行探测器内部以及不同探测器之间事例数据进行排序和合并，最后完成全部数据的磁盘文件存储。

数据获取系统硬件除了前端控制和机箱级读出节点外，实验厅内只有网络交换设备，与地面机房通过多路万兆光缆互联，其他所有计算系统均部署在地面计算机机房内，采用刀片式服务器构成分布式集群计算平台。尽量减少地下设备，可以降低对地下空间、电力和制冷等方面的需求，还可以更方便的管理和维护系统。

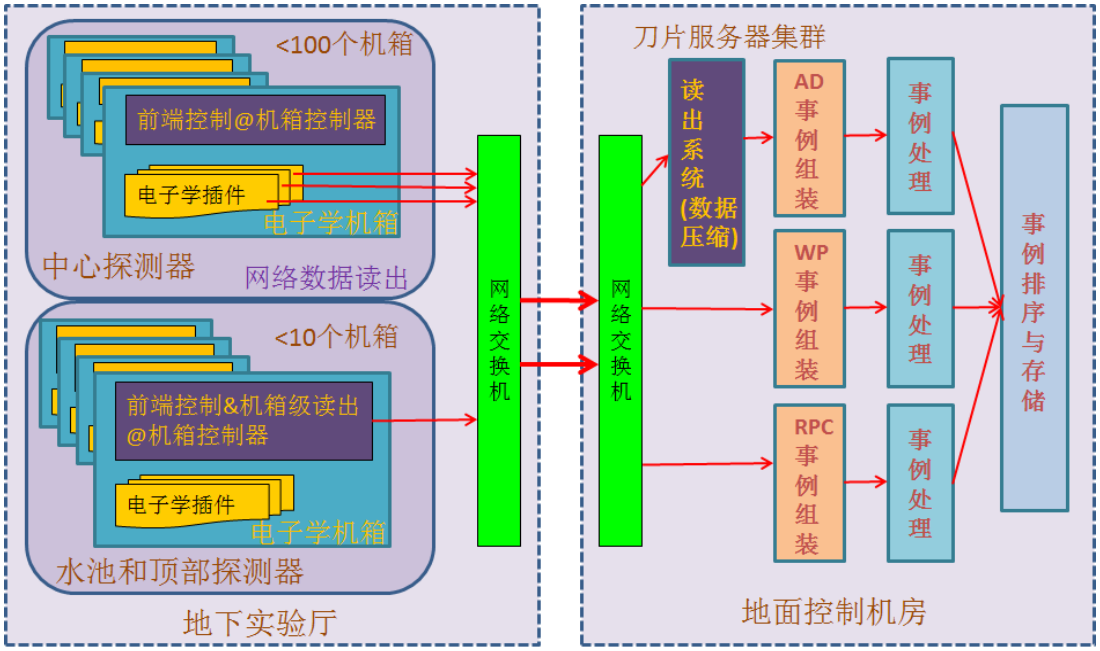


图 8-1 数据获取系统概念架构设计

波形压缩适合在每个读出分支的节点服务器上完成，直接减少后续处理和传输的数据量。

还可以用同样的方法对高能事例和超新星事例进行压缩，可压缩比例还需要研究。另外可以考虑对得到的事例进行数据分析，根据一部分条件，进行事例筛选，降低事例率（有损）；或者利用常规的计算机压缩算法进行数据压缩，压缩可分为事例级压缩和文件级压缩两种（无损）。

为了降低数据率，可以混合采用上述多种数据压缩方法，共同降低最后的存储数据率。

8.1.2.1 分布式读出和波形压缩

根据常规读出 2.1GB/s，最大读出 8GB/s 的性能要求。如果采用万兆网卡读出，仅需要 8 台左右服务器即可，但是考虑到在读出节点进行第一级事例组装和波形压缩，对 CPU 资源要求较高，需要更多的服务器来完成。因此采用千兆网卡读出，单台服务器可以做到 100MB/s 以上的读出能力，大约需要 80 台刀片服务器作为读出节点，最终读出服务器的数量由波形压缩性能决定。读出服务器总计需要约 40GB 以上的内存缓冲，就可以缓存超新星爆发情况下增加的数据，每台服务器只需提供 500MB 以上的内存缓存区。

波形压缩算法，最简单的方式就是通过设定一个适合的阈值，将小于阈值的数据删除，只保留大于阈值的采样点数据，具体的阈值的选取需要根据实验需求进行调整，但是基本的算法都是一致的。

8.1.2.2 事例组装

如图 8-2 为北京谱仪 III 数据获取事例组装流图，其中 PowerPC 是 VME 机箱控制器，负责电子学机箱级的数据读出和组装，然后将本级事例数据段通过网络发送给读出系统（ROS，Read Out Syste)。所有的 ROS 将自己收到的前端数据段的一级触发号（L1id）发送给触发同步管理器（TSM，Trigger Synchronization Manger），TSM 负责收集所有 ROS 发来的 L1id，同步判断事例数据的到达，当同一个 L1id 的所有 ROS 信息都达到之后，发送给数据流管理器（DFM，Data Flow Manager）。DFM 负责事例组装的调度，将该 L1id 的事例分配到一个空闲的事例组装节点（SFI，Sub Farm Input）上，该 SFI 向 ROS 请求对应 L1id 的数据，收到全部数据段后完成事例的组装，然后将组装完成的信息发送给 DFM，DFM 收到之后发 Clear 缓存的信息给 ROS，最后 ROS 将缓存该 L1id 的数据删除。整个流程通过数据驱动，利用 L1id 识别事例数据。

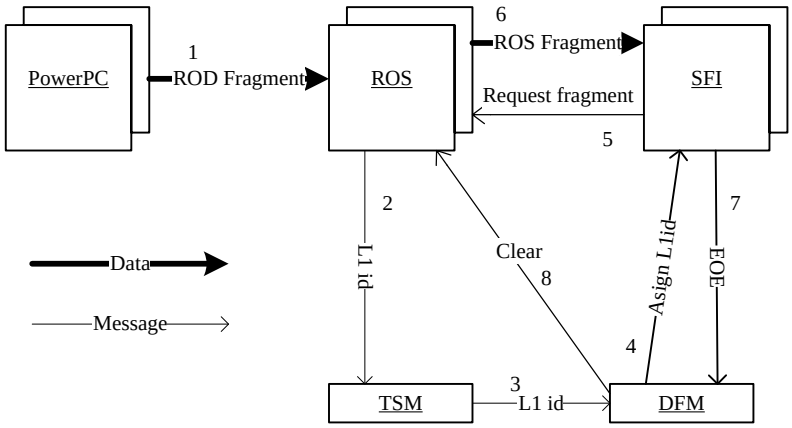


图 8-2 北京谱仪 III 数据获取事例组装流图

本实验将完全采用同样的数据组装数据流方案，PowerPC 这一级有两种可能，一种是和北京谱仪 III 一样的，顶部探测器根据设计可以沿用这种方式：三级数据组装；另一种是没有 PowerPC，直接由电子学通过网络发送数据给 ROS，中心和水池探测器可采用这种方式：两级数据组装。

8.1.2.3 软件触发

软件触发所需要的数据只需要提取 PMT 信号有效波形的时间和电荷量信息，并不需要完整的波形信息。按照 4GB/s 的处理能力，需要处理约 2KHz 事例率，平均着火 1000 个 PMT 计算，总的信号数量为 1MHz，其中每个信号有效的触发信息估计为 32Bytes（包括时间和电荷信息大小约为 16Bytes，其他通道及包装信息 16Bytes），触发数据总量仅为 64MB/s，只占数据处理带宽的很小一部分。软件触发可以采用 ATLAS 二级触发的方式，在事例组装之前完成，这样做的好处是经过软件触发，常规取数总事例率期望降低至 100Hz，可减少 900Hz 的事例数据，这部分数据量约为 1.815GB/s，可减少 45%的数据压缩处理带宽，降低 CPU 需求。但是由于提取触发信息和数据压缩一样，同样需要访问全部波形数据，能够降低多少 CPU 资源需要进一步研究和测试。

由于触发信息和事例组装数据量差别并不是太大，还可以采用另一种方案，按照 BESIII 和 ATLAS 的方式，在事例组装后进行完整事例的筛选。如图 8-3 所示为 BESIII 事例筛选数据流协作图，每个 EFD（Event Filter Dataflow）进程负责接收 SFI 发送的完整事例； PT（Process Task）运行离线算法对完整事例进行快速重建、分析或者高级过滤，最后 EFD 将重建后接受的事例送往 SFO（Sub Farm Output）作存储处理。这样的好处是软件系统可以与 BESIII 和 ATLAS 架构更接近，减少开发任务。

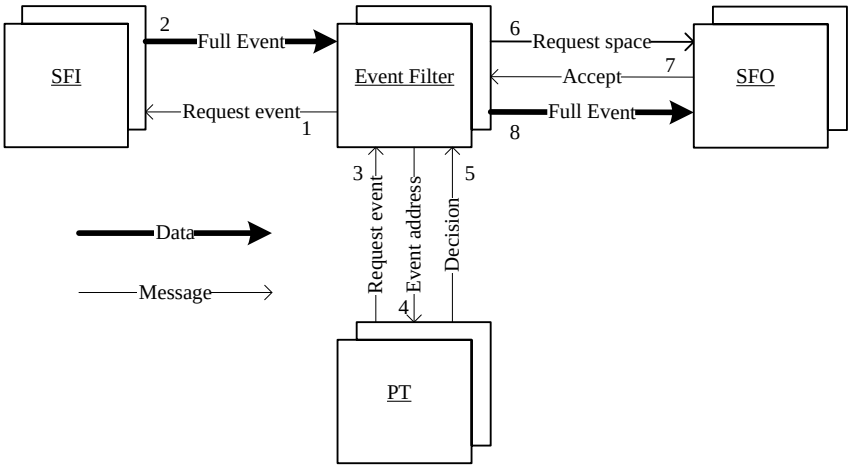


图 8-3BESIII 事例筛选数据流协作图

此外如果电子学系统采用无硬件触发方案，总计有 750MHz 的暗电流信号，触发数据将增加到 24GB/s。对于 PMT 暗电流信号，可以采用一定时间窗口内同时产生信号的 PMT 总数达到一定数量作为触发判选条件，这样可以去掉大多数的暗电流信号，但是不能降低放射性本底事例数据，还需要其它触发算法协同工作。由于读出数据量巨大，此时软件触发采用事例组装之前的方案更为合适，也可以同时启用事例组装后的事例筛选方案。

8.1.2.4 事例排序和存储

总计 500MB/s 的排序和存储性能最大需求，最好只部署一台高性能的存储服务器，将数据集中到一起，容易完成数据的排序。但是单服务器的性能可能存在限制，也可以采用多台存储服务器并行工作设计，但是对于事例排序，这些服务器的还需要按照时间片专门调度，保证每台服务器的存储文件中的数据在时间上是保序的。

8.1.3 技术预研方案

数据获取系统主要技术预研方向包括如下部分：

- 波形压缩算法和读出节点性能研究；
- 软件触发算法研究；
- 事例组装数据流设计；事例组装性能研究；
- 事例时间排序和高速数据持续存储研究（300MB/s）；
- 现场和远程系统实时运行监控和数据质量监测；
- 大规模集群计算设计和管理；
- 分布式数据处理和软件开发研究；
- 64bit Linux 系统环境的软件开发研究；

8.1.4 生产、装配与安装

数据获取系统硬件全部采用商业计算机和网络设备搭建，没有生产问题，不过需要调研测试不同品牌和型号的设备，综合设计硬件方案。地下网络设备与电子学系统一起完成安装，与地面机房通过光纤连接，地上商业设备放置在地面计算机机房内，设备的安装和系统集成可以通过厂家、销售代理商或者第三方系统集成公司完成。数据获取软件将在 ATLAS 实验、BESIII 和大亚湾中微子实验的数据获取软件基础之上进行自主开发。

8.1.5 风险分析与安全评估

数据获取系统数据波形压缩能力从估算得到（从 2KBytes 压缩至约 100Bytes），是否能够做到 20 倍这么高的压缩比例，与探测器和电子系的性能直接相关，存在一定的风险。另外江门实验电子学方案未确定，仍有无硬件触发方案的可能，这将对数据获取系统设计和研制冲击较大，需要进一步研究确定应对方案。除此之外，数据获取系统研制无其它大的风险，软硬件开发和运行也无特殊安全风险。

8.1.6 进度计划

2013~2015 年，数据获取系统开展关键技术预研，解决核心技术问题，完成读出节点数据压缩算法研究和性能评估，完成分布式数据流处理软件开发和性能研究；完成软件触发算法初步研究；根据电子学系统设计方案，完成数据获取系统设计方案，进行设计方案评审；

2016~2017 年，数据获取系统集成研究，完成电子学联调和测试；根据电子学系统设计方案，进行数据获取系统详细设计；完成数据获取系统软硬件详细设计；启动数据获取系统工程版软件开发，完成软件核心组件开发；现场部分网络和硬件的采购安装；

2018~2020 年，完成软件主要功能开发，完成现场硬件系统采购、安装和调试，完成数据获取系统软硬件集成测试，完成系统自身测试；具备全系统联调能力，完成数据获取系统与其他系统现场联调，完成数据获取系统研制，开始试运行，系统验收；

8.2 探测器监控系统(DCS)

江门中微子实验计划建造一个有效质量为 2 万吨的液体闪烁体中心探测器，含有约 15000 个光电倍增管；在中心探测器外部还有水屏蔽探测器，含有约 1500 个光电倍增管，以及顶部径迹探测器。本课题的总体目标是研制满足江门中微子实验需求的探测器监控系统。

探测器监控系统的主要任务是对诸多影响探测器性能的参数进行长期监测和控制，包括高压、温湿度、液闪液位及透光度、电子学、气体压力与压强、大厅环境和所有机电设备的工作状态；控制一些设备如刻度系统、气体系统、水系统、CCD 和电源等；系统实时监控设备的工作状态并记录数据，当有异常时能够及时发出警告，同时通过安全联锁装置自动动作，防止设备损伤和保护人身安全。由于探测器规模居大，共约有 1000 个温湿度监测点，2 万路高压监控和机箱、电源监控功能等。

8.2.1 指标

8.2.1.1 总体目标

本课题的总体目标是研制满足江门中微子实验需求的探测器监控系统。探测器监控完成共约有 1000 个温湿度监测点，2 万路高压监控和机箱、电源监控功能等。

研究目标是根据实验方案的整体要求，跟踪探测器、电子学及触发系统的设计方案，完成探测器监控系统系统的软硬件设计，完成各项软硬件预研和测试工作，开始工程版软件的开发，并与其他系统进行软硬件的联调工作。

8.2.1.2 主要考核指标

探测器监控系统考核指标，需要完成共约有 1000 个温湿度监测点，2 万路高压监控和机箱、电源监控功能等。需要根据实验要求设计总体软件框架，建立高压、温度监测等不同模块，确定与监控系统框架的硬件接口、软件协议、驱动程序及与上层软件框架的数据交换流程。

如下图所示

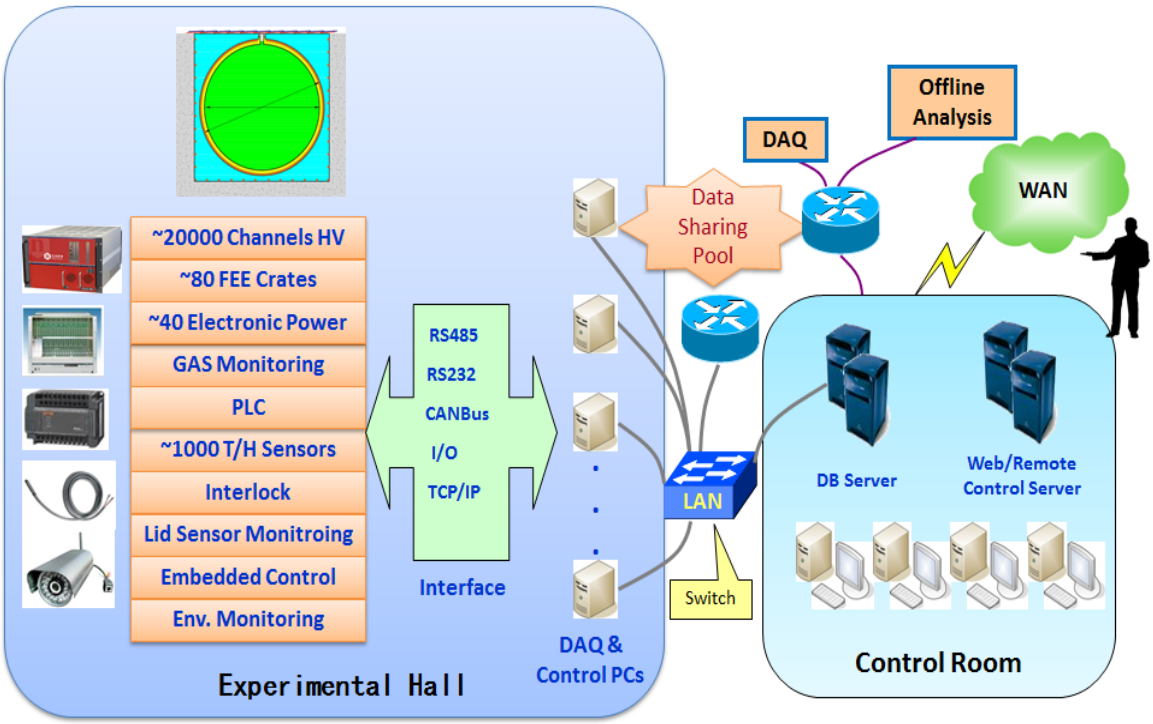


图 8-4 **探测器监控系统框架设计**

Figure 36 **Framework Design of Detector Control System**

8.2.2 研究方案

8.2.2.1 研究内容及技术路线

根据实验的实际软硬件需求，系统框架采用层次式的设计，分为全局控制层，本地控制层和数据采集层。其中全局控制层实现整体实验设备监控信息的汇总、安全联锁、远程控制、数据库存储、网络信息的发布和权限管理等；本地控制层实现实验厅内设备的本地控制，并支持本地设备监控、采集数据的存储、上传、报警及远程监控；数据采集层负责各种硬件系统接口，支持嵌入式系统如 ARM、FPGA；标准工业接口硬件如 PLC，；USB 接口和串口 RS232 采集；以及基于网络设备如 TCP/IP 的数据采集接口等。

系统采用分布式的系统开发方案。根据实验厅设备分布特点，开发分布式的数据交换平台。全局控制系统通过信息共享池交互控制命令与共享数据。配置文件采用规范的格式文本，可以实现分布式的远程配置文件共享与管理。

系统采用模块化的开发方法，实现各种复杂系统的快速集成。从功能上将系统分为数据采集、控制模块、报警模块、存储模块、数据共享及处理、系统配置、权限管理及用户界面等。各子系统可以根据实际的系统需求选择模块，拼装系统。

针对各种类型的硬件设备开发统一的数据采集接口。包括基于内嵌式系统开发的温湿度监控系统、气体系统，环境监测和有害气体监测系统，中心探测器液位监测系统，以及刻度系统等。针对内嵌式的系统，通过移植基于 linux 的嵌入式系统操作系统，经过系统剪裁，内嵌系统采集的数据可以直接通过服务的形式将采集的数据发布到网络的信息共享池，使得系统间的平台交互成为可能。

数据库存储采用基于 Linux 的 MYSQL 数据库服务器。提供从实验现场到高能所的数据库镜像，网页数据发布平台采用 Apache 服务器,Java，PHP 编程，通过对数据库访问实现监控信息的实时发布于历史数据查询。监测数据和报警信息可以实现实时网络监测。历史数据可以通过数据库和网页实现远程的查询和数据库绘图与分析。

软件的版本管理采用开源的 SVN（Subversion）管理平台，将软件分为合作开发级（brunch）、版本管理级（trunk）及发布级(release)，由于控制系统涉及合作单位较多，根据软件分布性、特殊性和复杂性的特点，分级管理有利于合作源码的开发与管理。采用 Trac 作为问题跟踪管理系统，实现团队合作软件开发。

目前，国内外大型高能物理实验中，对探测器、电子学长期稳定性监测是高精度测量不可或缺的一部分，一个典型的实验所监控量的数目达到上万个，对实验长期稳定运行具有极其重要的作用。可预期的监测内容如下：

- 高压系统本地及远程监控，包括中心探测器 PMT 高压系统，RPC 高压等。
- 探测器电子学机箱本地和远程监控系统，包括中心探测器电子学，RPC 探测器电子学，内外水池探测器电子学等，监控内容包括电子学插件温度，电源，风扇，低压电源过流保护等。
- 温湿度监控系统，包括中心探测器内液体温度监控，厅内环境温度监测。
- 气体系统监控，包括 RPC 探测器气体系统，中心探测器端盖气体系统
- 中心探测器溢流罐传感器本地监控，白油清晰度监控，内部液位照相监控等。中心刻度系统监测。
- 实验大厅环境温度，湿度，气压监控系统，氡气监测系统、视频监控等。
- 控制室总体监控系统，数据库系统及网页远程监控系统等。
- 纯水系统运行监控

随着探测器设计方案的逐步确定，以上内容还会根据具体的设计方案有所调整或增减。

8.2.2.2 核心科学技术问题

探测器监控系统的核心技术问题是系统将开发一套易于集成管理的模块化的系统软件框架，根据探测器硬件的需求，通过概念性的总体设计和模块化的详细设计实现系统的功能，对于商业系统或特殊设计的硬件系统，通过整合（Integration）的方法将采集模块与软件

框架有机结合。软件设计完成后经过反复的组装测试和性能测试后才投入使用，在试运行阶段不断反馈用户意见，经过调试运行期后，才进入正式的取数。

江门中微子实验站的探测器有效质量为 2 万吨液体闪烁体。其设计原理与核心技术与大亚湾中微子实验类似。其用于探测的靶物质为液体闪烁体，球形的中微子探测器中心为 2 万吨液体闪烁体，由直径为 34.5 米的有机玻璃容器隔开。靶物质的质量大小决定探测效率和事例数，是影响实验精度的最重要的因素之一，为此需要对靶物质的质量变化进行长期监测。同时，需要对中心探测器内温度进行监控。环境温度等变量不仅对探测器的性能有影响，探测器的能量标度，光电倍增管的噪声、放大倍数，电子学测量精度均依赖于稳定的环境，这就需要对实验各系统、各空间位置进行多点监控。因此需要设计可靠的监测系统，能够长期稳定地监测各种环境变量：如温度、湿度、电子学工作电压、电流、氡气密度、水池的精确水位等，以实现探测器性能的长期稳定，达到高精度测量的要求。

8.2.2.3 系统开发过程

为完成江门中微子实验研制任务，探测器监控软件采用软件工程方法中的瀑布开发模型，由于软件需求复杂多样，初期需求具有模糊性和不确定性，因此需求分析阶段使用 DOCDB 和 Wiki 收集和整理需求文档，通过概念性的总体设计和模块化的详细设计实现系统的功能，对于商业系统或特殊设计的硬件系统，通过整合（Integration）的方法将采集模块与软件框架有机结合。软件设计完成后经过反复的组装测试和性能测试后才投入使用，在试运行阶段不断反馈用户意见，经过调试运行期后，才进入正式的取数。

课题在预研阶段将建立一个小型的系统开发平台，用来开发硬件驱动，构建软件系统开发平台以及进行软硬件联合测试。每一个探测器子系统都将在该平台上做小系统模型测试，对于有条件提供小系统测试硬件的系统，可以以 1-2 台作为测试样机接入开发平台，用于前期驱动程序以及数据采集的开发。对于没有条件提供测试硬件搭系统，应提出设备模拟模型并与软件开发小组共同定义接口规范,包括数据格式，传输频率，控制流程，界面分布，物理量对应表等。

系统框架的开发采用模块化的软件开发方法。模块之间采用 Channel Access 协议作为标准接口，从而实现模块之间完全的松耦合。即在定义好模块之间的接口后，各模块可以独立开发，独立测试，最后再联合集成测试。各模块的开发采用瀑布和敏捷开发相结合的方法。总体上分为需求分析，设计，编码，测试等阶段。在开发出原型后，通过用户参与原型的使用来实现原型的不断演化。每一次的演化又是一次分析，设计，编码和测试的迭代。这样可以保证最终交付的产品是用户所期望的并已经熟悉了的产品。

技术路线：底层采用硬件 I/O controller (IOC) server。上层开发平台可以采用商业

组态软件如 LabVIEW 或开源平台，如 EPICS（一个广泛应用于各大型物理装置的控制系统软件平台）等。采用 Client/Server 的模式，保证较高的稳定性，可靠性和扩展性。

上层软件开发平台可以采用基于 Eclipse RCP 的 Control System Studio (CSS)，用于人机界面，报警系统，历史数据存储查询等。CSS 已经广泛应用于多个大型物理装置的控制系统，例如 ITER, NSLSII, FRIB，SNS 和 APS 等。CSS 采用 Java 作为主要开发语言，能够运行于各种主流操作系统，例如 Windows, Linux 和 X OS 等。CSS 基于 Eclipse RCP 平台开发，通过插件技术可以方便地进行扩展，并可以重用大量的 Eclipse 插件。用 CSS 开发人机界面基本不需要任何编写任何代码。但如果有非常特殊的要求，也可以通过脚本的方式实现。CSS 还包括报警系统，历史数据存储查询，日志记录，PV 管理和用户权限管理等功能。CSS 不仅是一个控制系统应用软件，同时也是一个开发框架。基于该框架可以方便地实现新的功能，并通过 Eclipse 插件的方式集成到 CSS 中。相比于 LabVIEW，EPCIS 和 CSS 可以分开用户界面和底层通信驱动，从而实现更高的可靠性，并能同时支持多个用户。相比于 Qt 技术，CSS 更完备，有更好的集成性，并且更易于使用和扩展。

采用 WebOPI， 基于 WebSocket 的 WebPDA, HTML5, CSS3 和 JavaScript 作为浏览器端网页开发技术。WebOPI 能够轻松实现在网页浏览其中浏览 CSS 开发的人机界面，但是对客户端要求较高，在移动设备上性能较差。WebPDA 是一个基于 WebSocket 的轻量级实时过程数据通讯协议，与 HTML5, JavaScript 技术结合使用可以开发出能够运行于移动设备的高性能实时用户界面。

关键技术：

1. 基于 EPCIS 和 ARM 嵌入式的通用信号采集板

   该通用信号采集板可以采集多路 4-20mA 或 0-10V 模拟信号，也可以与串口以及以太网设备通讯。内嵌 EPICS IOC 以及硬件接口驱动。可以通过简单配置就实现一个数据采集的 IOC，从而可以方便地测量各种物理量信号，例如温度，湿度，压力等信号。

2. 大批量 PV 与硬件地址的配置，管理和读写

   由于探测器监控系统需要对大批量 PV 进行操作，譬如上千道高压的同时升降，如何实现可靠简便的操作，配置和管理都具有一定的挑战。在这方面需要进行深入研究，实现一套完善的批量 PV 管理系统，大批量 PV 读写系统。

3. 高通道快速实时更新的网页技术

   在大型物理装置控制系统领域，还没有实现高通道快速实时更新的网页人机界面。在移动设备广泛普及的今天，若能在移动设备上随时随地对控制系统进行监控，将大大提高工作效率，并提高控制系统的可靠性。我们将把先进的 HTML5 技术引进控制系统领

域，首次实现在移动设备上运行高性能的控制系统人机界面。

8.2.3 课题管理机制

8.2.3.1 组织管理体制。

本课题研制人员，主要由高能所人员组成，高能所参与人员均为实验物理中心人员组成，核心成员具有北京谱仪三和大亚湾中微子实验数据获取和探测器监控系统的研制经验。探测器监控系统中探测器子系统硬件接口部分工作由探测器组自行组织人员完成，合作组内其他单位和大学可以参与探测器监控系统的部分软件开发与调试工作，全部课题管理将同时按照本项目和高能所的要求进行。

8.2.3.2 运行管理机制。

本课题前期（2013~2015 年），由于探测器和电子学系统还存在多种设计方案和可能性，本课题人员需要定期参加相关课题组的研制会议，同相关系统人员充分讨论和研究，获取不同方案的需求；主要根据相关系统的设计方案，按照不同需求分别进行本课题系统的预研和设计，课题组成员预计每季度进行一次研制进展的讨论会。涉及探测器设备设计内置的监控硬件，需要探测器预先提出需求，并通知设计人员参与组会或相关的讨论，方便设计人员充分了解硬件工作机制，更好地完成监控功能。本课题中期（2016~2018 年）主要进行工程版本软件的开发和测试工作，需要更密集的讨论，预计每月定期进行一次开发讨论会，并不定期的开展专项问题的讨论。为了配合和开展电子学系统的联调工作，根据电子学系统研制进展还需要和电子系相关人员开展联合讨论会。本课题后期（2019~2020 年），主要涉及全系统的联调和现场安装工作，主要参加相关系统和实验现场的集成讨论会议，本课题预计每季度进行一次研制进展的讨论会。探测器设备子系统安装现场调试时需有至少一名子系统专家配合软件调试工程师，并负责提供硬件参数设置文档并配合软件流程与功能性测试。系统软件交付使用后，应给出详细的使用文档，并提供必要的培训，有探测器专家负责系统的维护运行，本课题人员提供技术支持。

8.2.4 计划与结果

探测器监控系统将开发一套易于集成管理的模块化的系统软件框架，根据探测器硬件的

需求，提供数据采集，可视监测，数据记录，历史数据查询，远程监测与控制，安全联锁，动态数据可定制配置等功能。并在实验现场实现符合实验要求的探测器监控系统。探测器监控系统中与探测器设备监测相关的设备，如温湿度探头、刻度系统监测、嵌入式监测板、电源管理设备、视频监测等应根据实际需要搭建相应的配套设施，放置与固定设备。

具体年度目标与考核指标见下表：

表 1.探测器监控系统年度目标及考核

年度	年度目标	年度考核指标	重要任务 时间节点
2013 年	探测器监控系统小系统测试平台的预研，建立需求文档	考核小系统平台设备配置，系统间接口是否定义清楚	2013 年 6 月开始购买设备， 12 月完成设备安装
2014 年	根据探测器总体设计开始研发系统软件框架，并对小系统测试平台进行设备级测试	根据总体设计考核总体软件框架的合理性，建立高压、温度监测等小系统开发的软硬件平台，编写测试软件，给出性能结果分析报告。	2014 年底给出总体软件框架初步方案 2014 年 9 月完成至少一套小系统测试软件
2015 年	对总体设计框架进行细化，并细分功能模块；开始建立数据库测试系统	考核对总体设计框架进行细化功能划分是否合理，功能是否描述准确，并是否给出了合理的控制逻辑，数据库框架是否建立成功。	2015 年底完成基本功能模块划分，建立数据库模型

2016 年	对已有的硬件设备进行小系统的实测，确定硬件接口，驱动程序。	确定与监控系统框架的硬件接口、软件协议、驱动程序等，开始编写小系统数据采集程序，及与上层软件框架的数据交换流程。	2016 年 6 月测试已有硬件设备的驱动程序，与系统的接口。 2016 年 12 月完成小系统测试设备驱动与框架软件的集成。
2017 年	收集各系统的功能需求，建立文档，开始系统功能软件设计与开发。 开始订制现场小系统软硬件监测设备； 制定安装计划	根据探测器需求文档制定软件接口文档，命名规则，定义通讯协议和数据格式。 考核是否完成小系统软硬件的测试， 考核安装计划	2017 年根据探测器进度进行软件调试，在硬件和采集程序准备好的情况下，每个系统需要 3 个月的调试时间包括：驱动程序、数据采集软件和系统集成。
2018 年	完成系统主要功能开发。 根据探测器现场硬件系统安装和集成进度，开始子系统集成、调试与测试。	具备全系统集成能力，系统联调、测试。 对于硬件已经准备好的系统，集成完成后分系统组织评审；	2018 年中，根据硬件安装情况，在硬件准备好，交付联调 2 月内完成软件联调与测试； 年底根据已完成子系统情况组织评审
2019 年	在子系统本地软件联调的基础上组织配合其他系统联调，包括离线软件接口，DAQ 数据交换，子系统之间的安全联锁等，准备试运行。	联合子系统专家进行子系统本地软件的功能测试，考核与总控软件、数据库数据交换是否完成；参加子系统验收评审	根据工程进展，完成系统验收

2020 年	调试远程控制模块 开始正式运行	完成远程控制功能， 达到正式运行状态	系统验收

参考文献：

[1] 李飞，《BESIII DAQ 分布式数据监测研究与实现》，博士论文 2007。

第9章 离线软件和计算

9.1 设计目标和需求

9.1.1 需求分析

优质的离线软件系统对于提高物理分析的效率和质量具有至关重要的作用。物理分析对离线软件系统的需求如下：

- 跟对撞机的实验相比，中微子实验通常具有两个特点：1、事例间存在时间关联；2、信号事例数非常少，数据中绝大部分都是本底事例。因此，软件框架需要有灵活的数据 I/O 和事例缓存，一方面实现高效的数据访问和存储，另一方面提供访问一段时间事例的能力。
- 为了保证各部分软件算法和物理分析的一致性，软件框架需要提供如下功能：定义算法之间数据交换的接口，即事例模型；实现统一的几何管理，定义统一的几何服务；使用数据库来管理软件和物理分析中所需使用的参数，实现灵活可靠的版本管理，并定义数据库服务提供用户接口。
- 江门实验的事例种类非常丰富，除反应堆中微子事例外，还有超新星中微子、地球中微子、太阳中微子、大气中微子事例，以及天然放射性事例和宇宙线产生的各种事例，这些事例的物理过程非常复杂，要求离线系统提供全面的产生子软件包，精确描述中微子和本底与探测器的相互作用过程。
- 为了对探测器的设计提供物理依据，也为了深入理解探测器的行为，了解探测器的性能，需要开发探测器模拟软件，并实现探测器几何和物质的精确描述、建立物理相互作用模型、电子学读出系统的精确模拟并考虑本底与信号的混合。另一方面，物理分析所需的事例探测效率及系统误差也主要依靠模拟。
- 探测器的最终性能也依赖于事例重建。为了达到 3%/ √E 的能量分辨，需要建立起探测器内的光学响应模型，充分利用 PMT 的电荷和时间信息重建事例顶点和能量。事例顶点还用于排除探测器外部的天然放射性本底。为了降低宇宙线 μ 子引起的同位素本底，要求精确重建 μ 子径迹。对于大气中微子以及未来可能进行的加速器中微子物理研究，还需要提供探测器内部的短径迹事例重建，以及对不同种类的带电粒子进行鉴别。
- 为了直观展示探测器结构、探测器内部的物理过程、以及重建质量，需要开发事例显示软件。

预计江门中微子实验于 2019 年开始取数，届时每年将产生的原始数据约为 2PB，原始数据将通过专线网络传输到高能所计算中心。处理和分析这些数据需要建设一个大型的离线计算系统，用于产生模拟数据、数据处理产生的重建数据，并为物理学家提供良好的分析计算环境；存放中微子实验原始数据及蒙特卡罗数据，以及数据的归档等。初步估算该系统规模将达到不少于 10000 个 CPU 核计算能力、10PB 磁盘存储能力、30PB 数据归档能力，计算和存储设备之间将使用 40Gbps 骨干高速交换网络进行互连。，不仅如此，为了加快数据处理的速度，系统将通过分布式计算的技术整合合作组的成员单位的计算资源，以使不同计算站点可以实现协同工作、数据共享以及统一的计算任务分发。由此可见，江门中微子实验对数

据处理和分析、数据存储，以及数据传输、共享等均提出了较高的要求。具体表现在以下四个方面：

- 数据传输的需求

需要有高性能、高安全、高可靠的数据传输和交换平台，并对数据传输和交换过程状态进行实时监视和跟踪，实现数据传输可视化，保证实验数据能够及时、可靠地从实验现场传输到位于高能所的数据中心，同时保证实验数据在合作组内各数据中心间的分发和共享。

- 计算环境

为了保证江门中微子数据处理顺利进行，高能所计算中心将建立 10,000CPU/核的集群计算环境，同时，合作组成员将根据实际情况，提供相应的计算资源。其计算环境将不仅包括本地集群同时还包括合作组成员单位提供的异地计算资源，共同执行江门中微子实验数据计算任务。

- 数据存储

江门中微子实验数据量巨大，实验现场的原始数据需要及时地传输并保存在高能所计算中心，再加上模拟、重建计算后的数据，存储系统容量将达到 10PB，同时可以支持 10,000 个 CPU/核并发访问的性能。此外，存储系统将提供根据需求在磁带库和磁盘之间透明迁移的能力。

- 运行管理监控与信息服务支撑

为了保证江门中微子计算资源的稳定运行，将开发一套完善的智能化综合监控系统平台，建立完善的信息系统平台基础设施管理和业务系统管理流程，对计算环境和网络传输的所有流程实现细粒度监视与管理。该平台同时能够对资源整体使用情况做出评价，并根据累积的运行数据分析出相关服务的运行发展趋势以及对存在的潜在问题进行预警等。同时，还建立一套包括支持会议、文档管理、在线值班等科研信息管理平台。

9.1.2 系统概述

离线软件和计算系统包括离线软件系统和计算系统两部分，其发展和物理研究密切相关，是连接物理分析和探测器运行的桥梁，该系统的主要任务是将探测器和模拟产生的原始数据进行离线处理，生成物理分析使用的数据格式，同时提供物理研究需要的各种软件工具，提供数据处理所需要的集群计算环境和网络平台。

离线软件系统包括软件平台、事例产生子、模拟软件、重建软件、事例显示等内容。软件平台是离线软件的底层支撑系统，它为整个离线软件提供软件开发、编译、调试、部署的工具，以及事例模型、几何服务、事例显示、数据 I/O、数据库访问等功能，在此基础上实现从事例产生到探测器模拟、事例重建、物理分析的完整流程。

计算系统的任务是建立高效可靠的数据传输平台，将在线获取的原始数据传输到高能所计算中心；提供稳定的集群计算环境用于原始数据的处理和模拟数据的产生以及物理分析使用；建立海量数据的存储系统；建立细粒度的综合监控平台，对计算资源的运行情况进行全面的监控与管理。

9.2 JUNO 离线软件系统设计

9.2.1 软件平台

离线软件需要解决复杂多变的数据处理需求，同时其开发过程也面临人员分散等现实约束。统一的软件平台能提供规范的软件开发和运行环境，利于资源优化和人力整合，从而促进软件的开发、使用和维护。

基于已有经验和未来软件发展趋势，JUNO 软件平台除保证对 Linux 操作系统和 GNU 编译器的兼容外，也将适当考虑对其它环境的移植兼容问题。我们使用 CMT 工具配置并管理软件包的依赖和编译，统一并简化软件的编译困难，使开发人员能更专心于软件功能的实现。随软件同时发布无人值守式安装工具，便于软件的安装部署，同时也利于实现软件的自动编译测试。

目前多语言混合编程技术已经成熟，从而可以针对性的选择不同语言实现软件的不同部分。以 C++语言保证软件核心功能的运行效率，以 python 作为用户接口弥补 C++欠缺的灵活性，在高能物理实验中已有成功前例。准标准库 Boost.Python 是处理 C++和 python 混合编程的合适选择。通过恰当的底层软件设计，多数用户可以忽略 Boost.Python 细节，不用增加学习和开发负担就享受到混合编程的好处。

JUNO 软件平台还包括离线软件的底层支撑系统 SNiPER——一个新的面向非对撞机物理实验的软件框架。如图 9-1 所示，SNiPER 框架是 JUNO 软件的底层支撑，模拟、重建等应用软件以插件的形式在 SNiPER 中运行。SNiPER 设计目标是简单高效并兼顾通用性，它依赖尽可能少的外部软件库，避免过度设计和效率损失。

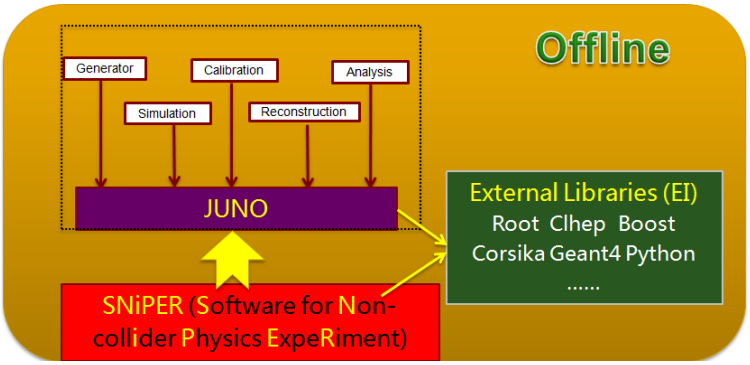


图 9-1 离线软件系统的构成

SNiPER 框架核心部分是整个系统可靠性的基础，决定了整个系统的生命力。为此整个系统采用模块化设计和管理，以功能单元对软件进行模块划分，以动态库方式加载和运行模块功能。模块设计遵循弱耦合、强内聚原则，模块间仅通过接口通讯，一个模块的改变不会对系统其它部分造成影响。这样提高了软件系统的灵活性和可扩展性，缓解了开发人员分散的问题。

通过借鉴 Gaudi 等框架中的先进思想，把模块按功能分为算法和服务两种类型。算法针对数据处理中的特定过程，一系列算法的串联构成数据处理的完整链条；服务则为用户提供公共的软件功能，由用户按需调用。算法和服务作为插件式的模块，均可以根据作业类型进行灵活组合或替换，并动态加载运行。

数据处理过程中，经常需要同时读取不同来源、类型或格式的数据，也需要按需以不同方式写出多种计算结果。框架中要预留多数据流 I/O 所需的接口，当数据模型及其 I/O 服务

确定后，才能够方便的同框架中其它功能模块进行通信。当前大数据处理面临磁盘速度瓶颈，在 I/O 功能的开发中要始终兼顾效率问题。通过使用延迟加载等方法，可以提高计算资源的利用效率。

框架软件还要实现数据处理和物理分析过程中所需的常用功能，比如信息输出、粒子属性查询、系统资源记录、数据库访问和直方图创建等；这些内容以服务的形式提供给用户，从而优化基于框架的开发体验。框架中模块管理功能利用 Boost.Python，允许用户使用 python 脚本完成作业的配置，控制功能模块加载、定制作业流程以及修改运行参数等，提升用户的使用体验。

粒子物理实验周期长，在离线软件发展和使用过程中常常出现新的计算技术与工具，因此我们还要求框架软件具有良好的易集成性，以便能够适时地集成优良的工具和软件包，缩短软件开发时间，提高软件系统的功能。

JUNO 实验预期数据量极大，数据处理会耗费可观的计算资源和时间。为充分利用可调动的计算资源，可应用多种并行计算技术。目前计算机已普遍进入多核时代，从框架系统底层对多线程的支持，可发掘多核 CPU 的计算能力，提高单个任务的执行效率。针对高速网络连接的计算集群，可实现 server/clients 结构的分布式计算系统，由 server 负责任务分发和结果收集，clients 负责具体计算任务的实施。此外，我们还可以跟随最新的计算机和粒子物理实验的发展方向，研究并探索网格、GPU 计算、云计算等技术的应用开发和部署。

9.2.2 事例模型

事例模型指在粒子物理实验离线数据处理过程中，事例在不同处理阶段所需处理或生成的相关信息的组织方式，同时也提供了数据间实现关联的机制。它是离线软件框架数据管理、文件输入输出、分析计算以及数据存储的实体，是决定离线软件整体性能和功能的核心因素。

基于 ROOT 软件在粒子物理计算领域的广泛应用以及其在数据管理和数据存储方面的优越性能，江门中微子实验事例模型基于 TObject 进行设计和扩展，所有事例信息类以及关联信息类都是 TObject 的派生类，实现了 ROOT 对 C++对象的版本进化(Schema Evolution)、输入输出流（I/O Streamer）功能，运行时类型信息（RTTI）以及检查(Inspection)功能等简化了离线软件框架的复杂性并提高了事例模型的性能。

为实现数据的快速处理以及筛选功能，将事例信息进行了多层次结构设计，每个数据的处理阶段均由一个 Header 类和一个或多个具体 Event 类构成，如图 9-2 所示。Header 类包含一个事例的辅助信息（比如 Run 号、事例号、时间戳等），同时还包含部分事例的特征信息以便允许用户在不加载详细的事例信息的情况下实现对事例的快速筛选功能。事例信息指事例在处理阶段所需处理或生成的相关信息。事例间的关联机制通过研究开发类似于 ROOT TRef 的智能指针技术，实现事例模型在不同的数据处理阶段之间的关联以及事例模型内部数据之间的关联，同时研究开发关联数据在数据存储时只需存储一次的技术，避免在建立事例模型之间灵活关系的同时同一数据存储多份的现象。

由于事例模型的代码实现具有明确、规范的操作，因此设计开发了基于 Xml 文件定义事例模型的工具 XOD，实现了从 xml 文件自动产生 C++代码、输入输出流（I/O Streamer）函数，运行时类型信息（RTTI）等，提高了事例模型定义的可读性、减少了重复性代码的手工定义，提高了效率。

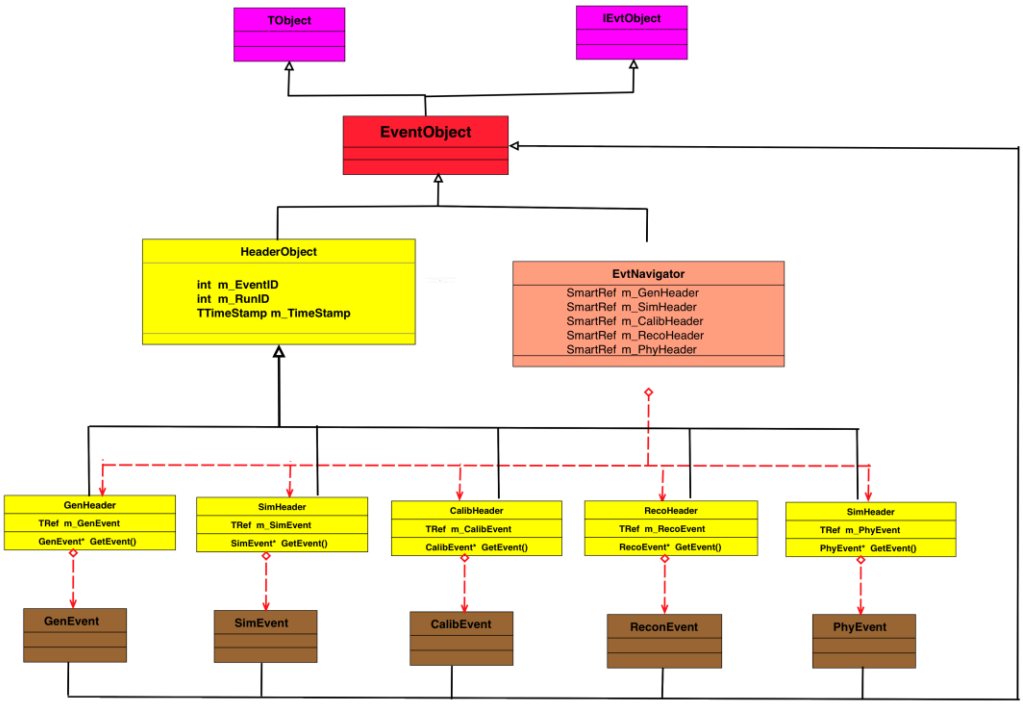


图 9-2 事例模型设计方案

9.2.3 几何管理

几何管理系统是对探测器几何数据和结构的软件描述与管理，并提供给模拟、重建、刻度、校准、分析、事例显示等应用使用。为保证各软件应用中几何结构的一致性，必须使用统一的几何描述。在描述中不仅要保证几何数据的一致性，还要保证几何结构的一致，同时还要允许几何描述随时间可变。对于不同版本的几何，需要在不同应用之间实现一致而有效的管理。几何管理系统需要提供对所有子探测器的软件描述，包括中心探测器、切仑科夫探测器、顶层符合探测器、刻度系统等。

当前在高能物理实验中流行的几何描述软件工具包括：XML（eXtensible Markup Language，可扩展标志语言，具有较大自由度和自定义功能），HepRep（高能物理实验常用的几何描述，带有 Geant4 和 Java 接口），VRML（Virtual Reality Modeling Language，虚拟现实建模语言，一种专为 WWW 设计的三维图像置标语言，定义了描述三维模型的编码格式和描述交互或脚本的编码及行为模式，现已升级为 X3D），GDML（Geometry Description Markup Language，几何描述标记语言，带有 Geant4 和 ROOT 接口）等。

在 JUNO 探测器的设计阶段，计划基于 GDML 进行几何管理，包括对几何数据、探测器结构层次、物质、光学参数等属性的描述和管理。考虑到在设计初期，存在多个几何设计版本的复杂性及其频繁变动的可能，使用 GDML 管理几何能够在不同应用间保持探测器描述的一致性。利用 GDML 现有的 Geant4 接口和 ROOT 接口，能够在较小的工作投入下，将基于 GDML 的几何描述自动转化为 Geant4 和 ROOT 软件中相应的几何描述，有利于快速实现统一设计的几何描述在不同应用中的共享。但同时也应该注意到，GDML 的 Geant4 和 ROOT 接口仅支持大部分常用功能，而且两个接口提供的功能并不完全一致，因此对于复杂的几何形状，光学参数，光学表面描述等，需要考虑另外的途径进行管理和传输，或者对现有的 Geant4 或

ROOT 接口进行扩展（视用户需求、复杂度、可维护性和工作量大小而定）。在将来探测器设计趋于稳定的情况下，考虑以数据库提供和管理底层的几何数据，而将 GDML 作为其中链接底层几何数据和模拟、重建等应用的一种选项。

在现阶段，计划实现的具体方案是在 Geant4 探测器模拟中统一描述几何并作为几何数据的唯一来源，通过 Geant4-GDML 借口转化为相应的 GDML 描述。考虑到各种探测器设计已经在模拟程序 Geant4 中实现，并且不同的设计由不同人员进行维护和改动，该方案无需对 GDML 软件的了解，可减小工作量。同时在模拟作业中实现一个新功能，将 Geant4 转化出的 GDML 描述，自动通过 GDML-ROOT 借口转化为相应的 ROOT 几何对象，并与同一个作业中的事例数据绑定输出到同一个 ROOT 文件中。该功能能够实现几何数据与事例数据的匹配，减少在其他应用（比如重建，事例显示）中，由于几何的频繁改动，程序版本更新所导致的事例与几何不匹配等错误。该功能将设计为可选，批量作业中可以只在第一个作业中开启而输出几何，避免占用过多存储空间。

在其他应用中，几何数据的输入将由模拟输出中的 ROOT 几何对象所提供。由于不同几何设计版本的存在，需要实现一个算法，通过对 ROOT 几何对象的探测器单元及其结构进行解析，确定输入的几何版本及相应的 Identifier 结构与范围，建立各探测器子单元（比如每个 PMT）与 Identifier 之间的对应，以供其他应用使用相应的几何信息。

在确定探测器设计后，将由数据库管理所有不同版本、不同时刻的几何信息，并作为唯一的几何数据来源，由其提供统一的几何描述给模拟、重建、事例显示等应用。基于 GDML 的描述将继续作为其中的一种可选工具，提供几何信息传递和验证的途径。

9.2.4 产生子

产生子给模拟程序提供进行模拟的初始粒子信息，包括粒子种类、粒子四动量、入射方向、入射时间、粒子初始位置坐标等。

江门中微子实验使用的产生子包含反β衰变产生子、天然放射性产生子、宇宙线产生子、Neutron 产生子、刻度源产生子等等。其中一部分可以从大亚湾实验移植过来，一部分需要另外修改或者重新开发。产生子的类型有下面几种，一是基于 Geant4 的 ParticleGun 来产生单粒子，二是基于 Fortran 语言开发的产生子，比如 U238 和 Th232 天然放射性产生子，三是基于 C++语言开发的产生子。产生子生成的数据为 HepEvt 或者 HepMC 格式。我们计划统一采用 HepMC 格式的产生子接口程序。同时，还需要根据实际需求灵活设置粒子产生的顶点位置，例如在液闪体积内均匀产生、在光电倍增管表面产生、在有机玻璃材料内任意产生等等，我们需要开发相应的代码来实现产生位置的抽样。

9.2.5 探测器模拟

江门中微子实验的探测器模拟程序基于 Geant4 开发，探测器模拟程序包含探测器几何的精确描述和物理相互作用模型，模拟信息的记录、用户界面等内容。

- 探测器几何的精确描述

探测器几何的精确描述是探测器模拟的基础。模拟软件中需要精确构建液闪、有机玻璃球或者尼龙袋或者有机玻璃模块、光电倍增管、钢罐或者钢架的几何结构，同时计算每个光电倍增管的摆放位置和转动角度，并且保证不同几何结构之间没有重叠，否则程序运行会出现速度非常慢或者死循环现象。在探测器设计阶段，探测器几何可能会经常变动，可以考虑模拟软件同时输出探测器模拟事例数据和几何数据，在事例重建时读入这些数据进行重建，

保证模拟和重建用到的几何是一致的。同时，要做到能够根据设计方案灵活变动几何结构，同时考虑理想几何与实际几何之间的差别。

液体闪烁体探测器模拟中光学过程的模拟是个关键问题，因此需要定义液体闪烁体、有机玻璃、矿物油、光电倍增管玻璃等物质的光学参数。光学参数分为很多种，例如折射率、吸收长度、光产额、量子效率等，每一种光学参数都是随波长变化的一个数组，而且参数可能会随时间变化，或者随入射位置变化，例如液闪的吸收长度会随时间变化，光电倍增管的量子效率可能会随入射位置和角度的变化而变化，而且每个光电倍增管的参数都可能不一样，需要逐一设置，这些光学参数的有效管理是研究的重点之一。拟采用的技术路线是以国际通用的模拟工具软件 Geant4 为基础，结合 GDML/XML 和数据库技术来构建探测器几何，实现探测器描述的灵活加载和光学参数的有效管理。

光学过程的模拟除了需要定义上述的光学参数以外，还需要定义光学边界，当遇到不同介质的边界时，光学光子的行为会随着边界处两种材料的光学特性的不同而不同，主要的过程有折射、反射、界面处的吸收。

- 物理相互作用模型

江门中微子实验的探测器模拟需要的物理相互作用模型包含标准电磁过程、光核作用、离子相互作用、强子相互作用、可见光相互作用、以及描述 PMT 光学模型的参数化过程。可见光过程如闪烁发光、契伦轲夫光、光吸收、瑞利散射等。

带电粒子穿过液闪介质时，电离能损转换为闪烁光的过程中，液闪的发光与在液闪中的电离能损间存在非线性关系，需要考虑淬灭效应。光在液闪中传播过程中，存在吸收和重发射过程。这些过程在 Geant4 所包含的一些标准物理过程中并没有，因此需要根据实验要求来实现这些特殊物理过程的模拟。

此外，对于江门中微子实验这样的大型液体闪烁体探测器来说，高能宇宙线缪子事例在液闪中的模拟过程速度非常慢，不能满足数据产生的需求。因此我们计划对这种事例进行特殊处理，将光产额缩小一定倍数从而使得缪子事例穿过液闪过程中发出的闪烁光大量减少，大大减少模拟时间，光产额缩小的倍数需要经过仔细研究进行调整。

- 模拟信息的记录

探测器模拟程序输出 Geant4 tracking 过程中的 hit 信息，包括光电倍增管上的光电子数以及每个光电子的 hitTime。这些信息用于后续的电子学模拟程序的输入。除此以外，为了便于后续的分析，还需要记录模拟过程中的 particle history 信息，比如发生中子俘获的位置和时间，沉积能量、沉积中心位置、光子入射到 PMT 表面的位置和角度、track 和 hit 之间的关联等。

- 用户界面

考虑到模拟软件使用者的需求，探测器模拟程序需要提供给用户友好的用户界面，使得用户可以根据需求灵活的配置模拟参数，例如液闪半径、屏蔽层的厚度、初始粒子产生位置、粒子种类、某种物理相互作用的开/关、刻度装置的加载/卸载等等。目前部分参数已经可以在作业脚本里面灵活配置。

9.2.6 数字化模拟和本底混合

9.2.6.1 探测器数字化模拟

探测器数字化模拟主要包括电子学模拟，触发模拟以及读出系统模拟几个部分。主要目的是在模拟中再现探测器的真实响应，从而考虑到电子学及触发系统对最终物理结果可能带

来的影响。而读出系统的模拟是为了使探测器模拟的数据结构与实验数据保持一致，以便我们能够使用相同的数据分析程序处理模拟数据和实验数据。探测器数字化模拟软件开发将在江门实验离线软件框架内进行。

电子学模拟是数字化模拟中的重中之重，江门中微子实验将使用 FADC 记录每个 PMT 的输出波形信息，并在离线对波形进行分析处理，得到最终的幅度和时间信息。电子学模拟以每个 PMT 上的击中信息(由前端 GEANT4 模拟给出)作为输入，以电子学的读出信号作为输出。在这一过程中，需要合理构造 PMT 单光电子响应模型，例如信号的幅度，波形形状，以及前脉冲与后脉冲结构等。再根据前端电子学设计，模拟电子学响应过程，例如对信号的放大，展宽，滤波成形，FADC 取样等，得到最终的读出信号波形。同时为了得到真实的单光电子响应，还需要考虑由 PMT 带来的噪声信号。对于一个 PMT 同时具有多个击中的情况，还需要考虑波形的叠加，以及由此可能带来的波形形变及非线性效应等。另一方面，对于探测器内的超大信号，例如 Muon 事例，记录 FADC 波形显得较为困难，我们将在电子学内对其进行积分，记录其幅度信息。电子学模拟也需要考虑这一过程。在当前阶段，由于电子学设计还未确定，我们在电子学模拟中暂时使用了大亚湾实验电子学的完整响应过程，加入 FADC 模拟，记录信号波形。待江门实验电子学设计确定后，将实现其完整的 PMT 及电子学响应模拟。

触发模拟是以电子学模拟的输出作为输入，模拟真实触发系统中的触发逻辑，时钟系统等，并给出当前事例是否满足触发条件等信息。目前，我们实现了简单的 NHit 触发模拟。

读出系统模拟以触发模拟给出的触发信号时间作为参考，将一固定时间窗口内每个 PMT 的 FADC 采样信息记录下来作为一个事件(Readout)，模拟真实探测器 DAQ 的响应过程，采用与实验数据相同的数据结构记录模拟结果。

9.2.6.2 本底混合

实验数据中除了包含我们感兴趣的物理信号以外，还包含大量的天然放射性和 Muon 本底等。为了模拟真实探测器的响应过程，我们需要在模拟中将物理信号与本底信号进行混合，以期尽可能接近真实情况，从而有助于我们较好地理解探测器响应和得到可靠的物理结果。对于本底混合，有两种方案：一是在 Hit 级别进行混合，二是在 readout 级别进行混合。Hit 级别的混合是指根据物理信号和本底信号各自的事例率，将其所产生的 Hit 按照时间顺序在时间轴上排列，作为后续电子学模拟的输入，最终产生混完本底的模拟数据。这种方案的最大好处是可以自然地考虑物理信号与本底信号或本底信号之间在同一时间相叠加的情况，缺点是增加了数据存储和计算机内存使用的压力。而 readout 级别混合实现起来较为容易，但缺点是对两个或多个信号相重叠的情况只能做近似处理。目前，我们初步实现了 Hit 级别物理信号与本底信号在同一时间相重叠的混合。将来，我们将根据具体情况进行综合考虑，进而确定未来江门实验的本底混合方案并实现混合算法的设计与开发。

9.2.7 事例重建

9.2.7.1 PMT 波形重建

根据读出电子学采样得到的波形重建 PMT 接收到的总光电子数和首次击中时间。重建

方法分为波形积分和波形拟合两种。波形积分方法是直接对采样点求和并进行基线减除，通过波形的过阈时间得到首次击中时间并进行幅度修正。波形积分方法速度比较快，可以用于中微子事例挑选。波形拟合方法通过建立 PMT 的响应模型拟合得到总光电子数和信号到达时间，有一定能力区分快慢信号，并能够极大地降低 PMT 后脉冲、电子学过冲等效应给信号带来的畸变。波形拟合方法速度比较慢，可以用于经过预选之后的中微子候选事例的重建，或用于刻度数据小样本的重建研究。

9.2.7.2 中心探测器事例顶点重建

由于反应堆中微子的能量集中在 10MeV 以下，可以近似为点源来处理。事例顶点可以通过点光源到达不同 PMT 的相对时间来进行重建，构造似然函数进行拟合：

$$F(x_0, y_0, z_0, T_0) = -\sum_i \log\left(f_t\left(t_i - T_0 - \frac{L(x_0, y_0, z_0, x_i, y_i, z_i)}{c_{eff}}\right)\right)$$

其中待拟合参数 x_0, y_0, z_0, T_0 表示事例的顶点和起始时间，x_i, y_i, z_i, t_i 表示第 i 个 PMT 的几何位置和击中时间，c_{eff} 表示光在探测器中的速度，f_t 表示扣除飞行时间后 PMT 击中时间的概率密度函数，其中包含了液闪探测器中发光时间分布以及 PMT 本身的时间分辨。如果 PMT 及读出电子学有能力区分多次击中的光子，则 f_t 可以解析的表达，如果无法完全区分，则 f_t 可以通过模拟得到。由此可见，对液闪发光时间的理解、电子学系统对多次击中光子的区分能力以及 PMT 的时间分辨能力是顶点重建的关键。为了得到可靠的拟合结果以及提高拟合速度，需要首先通过 PMT 电荷重心法得到粗略的顶点位置，作为似然函数法的初始值。

9.2.7.3 事例可见能量重建

点源的可见能量重建通过中心探测器中 PMT 测到的电荷构造似然函数进行拟合：

$$\mathcal{L}(E_{vis}) = \prod_{unhit} P_{no-hit}(E_{vis}, i) \times \prod_{hit} P_{hit}(E_{vis}, i, q_i)$$

其中 E_{vis} 为待拟合参数，等式右边前后两项分别表示第 i 个 PMT 没有光子击中和有光子击中且电荷量为 q_i 的概率。计算概率需要用到的期待电荷基于探测器中的光学模型，包括液闪光产额、液闪和屏蔽层的衰减长度、PMT 的角度响应、PMT 本身的电荷分辨能力等描述探测器性能的参数，以及通过顶点重建得到的事例顶点。通过独立的实验对光学参数进行测量和约束是能量重建的关键。另一种快速的重建算法基于所有 PMT 的总电荷，并结合探测器中不同位置能量已知的放射源事例进行刻度。

9.2.7.4 径迹重建

高能宇宙线缪子或者高能的大气中微子通过带电流过程产生的电子和缪子在探测器中会留下一段径迹。中心探测器中的径迹重建基于 PMT 的击中时间信息。对于可见能量在 GeV 量级的高能事例，PMT 的首次击中时间基本来自于液闪发光的快成分，在 ns 量级，因此近似服从高斯分布，其宽度基本取决于 PMT 的时间分辨。可以通过构造 χ^2 函数进行拟合：

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{t_i^{\exp} - t_i^{mes}}{\sigma} \right)^2$$

其中 t_i^{exp} 和 t_i^{mea} 分别表示第 i 个 PMT 的期待击中时间和实测击中时间，σ 表示 PMT 时间分辨。期待击中时间通过待拟合的径迹参数和光学模型计算得到，如**图 9-3** 所示，其基本思想是根据闪烁光各向同性的特点，计算发光点和 PMT 连线与径迹方向的夹角 θ，从而确定 PMT 看到最早到达的光位于探测器内部或是径迹入射点。对于穿过中心探测器的事例，在入射点和出射点因为到周围 PMT 的距离最近，因此会在附近 PMT 上形成电荷较多的簇团，可以直接用权重法计算两个电荷最多簇团的中心位置，从而对 χ^2 拟合提供进一步的约束。

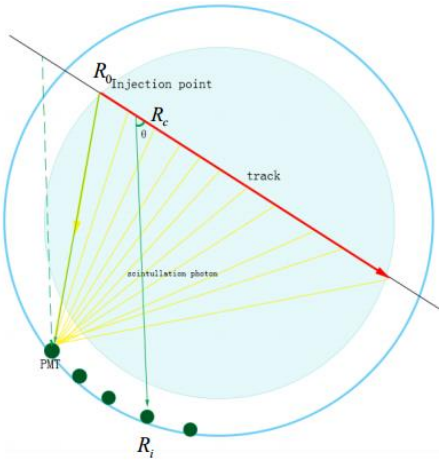


图 9-3 径迹重建示意图

9.2.8 事例显示

事例显示为离线软件中的探测器设计、模拟、事例重建和参数调试等提供一个直观、快捷而有效的工具。基于图形界面的分析系统，能够将探测器几何、事例和分析结果同时显示，从而有效提高模拟、重建中算法调试和物理分析的效率，同时为物理分析结果的发布提供展示材料。

- 探测器几何的描述和显示

事例显示中探测器部分的显示，使用几何管理提供的探测器描述作为几何数据输入，并通过 Identifier 建立与探测器单元之间的关联。探测器的显示模式将支持三维显示和二维投影两种模式。二维显示计划以 ROOT 自带的多种二维 Histogram 实现。三维显示引擎当前流行的有 OpenGL、VRML、X3D 等，目前倾向于 OpenGL，将考虑基于 OpenGL 底层，或基于 ROOT 已有的部分 OpenGL 探测器三维显示功能开发两种方案。

- 事例数据接口及事例显示

事例数据包括模拟数据、原始数据、重建数据和数据分析结果。它们的数据格式，将由江门实验离线软件中的数据模型统一定义格式，并通过接口输出到事例显示软件中。

在显示过程中，需要研究如何更好的显示模拟数据中的粒子飞行径迹和相互作用过程，基于探测单元的粒子响应和探测器击中，重建出的事例顶点、轨迹、能量等信息，以及综合重建信息得到的事例整体信息。更为重要的是，需要研究和处理各种数据之间的关系，以及它们之间相互关联的显示模式。

- 图形用户界面

图形用户界面（Graphical User Interface，简称 GUI）是指采用图形方式显示的计算机操作用户接口。与早期计算机使用的命令行界面相比，图形界面对于用户来说在视觉上更易于接受。在高能物理实验事例显示软件中，用户图形界面主要表示为通过各种形式（按钮、滑尺、复选框等）的图形控件的操作来方便快捷的实现命令行的功能，包括对事例流程的控制，显示内容在三维空间的平移与旋转，缩放等控制，事例飞行过程和视频制作的时间控制，以及数据的读入和显示图片或视频的输出。

图形界面的开发考虑基于两种方案。一种是基于外部软件 GLUI 或 GLUT，能够与 OpenGL 显示引擎更好的结合；另一种是基于 ROOT 提供的用户界面系统，能够更方便的实现与探测器几何数据和事例数据之间的交互。二者各有优点，目前正在开发一个基于 ROOT 的简单图形用户界面。

- 图形数据分析和调试功能

基于图形的数据分析调试，比如重建算法调试和物理分析中的调试，是一种辅助数据重建和数据分析的有效手段。这些功能包括，通过参数的设置选择感兴趣的击中和径迹的显示与否；通过触发信息筛选事例；通过使用鼠标来“选择”某个击中或径迹，以互动的方式显示与其相关联的其他径迹信息或模拟中的真实信息等。基于图形还能够进行一些初步的分析，比如显示各种类型的柱状图，判别事例类型等功能。

9.2.9 数据库服务

数据库在离线数据处理过程中发挥着越来越重要的作用，可用来保存复杂探测器的几何尺寸、位置信息、光学参数、运行环境，刻度常数，版本演化，文件簿记等信息，并实现对以上数据的新增、查询、修改、合并、删除等管理功能。

粒子物理实验常用的底层数据库主要包括 Oracle，MySQL，PostgreSQL 以及 SQLite 等。这些数据库均提供了多种编程语言的应用编程接口 API。江门中微子实验的数据库接口将采用三层构建方式：底层是数据库自身的应用接口；中间层为基于 API 而开发的面向江门中微子实验离线数据处理需求的扩展接口；顶层为根据离线软件框架而开发的服务接口，方便用户简单、快捷地实现对数据库的各种操作。

我们将基于大亚湾中微子实验开发的数据库接口 DatabaseInterface 进行优化和扩展，提高其对 C++对象的读、写、查询、同步、备份等方面的性能，提供更为灵活和规范的底层数据库接口，实现兼容多种底层数据库的可能性。

从数据信息安全的角度考虑，架设两种数据库服务器：主数据库服务器和从数据库服务器，提供主从数据库服务器间信息的自动检查、同步、备份功能。主数据库服务器用来管理所有信息并只允许其它从服务器访问；从服务器负责从主服务器上获取信息并提供给离线数据处理访问的接口。

9.3 JUNO 计算系统设计

9.3.1 计算网络

9.3.1.1 数据专线和公共网络环境

如**图 9-4** 所示，连接到高能所和江门中微子实验站的数据专线（命名为 IHEP-JUNO-Link）带宽设计为 1Gbps，该带宽将被用于江门中微子实验站同高能所数据中心间的实验数据传输和实验站现场办公网络环境连接等。1Gbps 的带宽能够充分满足江门中微子实验数据的稳定传输（～2PB/year, ～544Mbps），剩余的网络带宽可以作为数据传输和网络中断所需恢复的带宽，以及用于研究人员进行远程监测、办公所需要的带宽等。

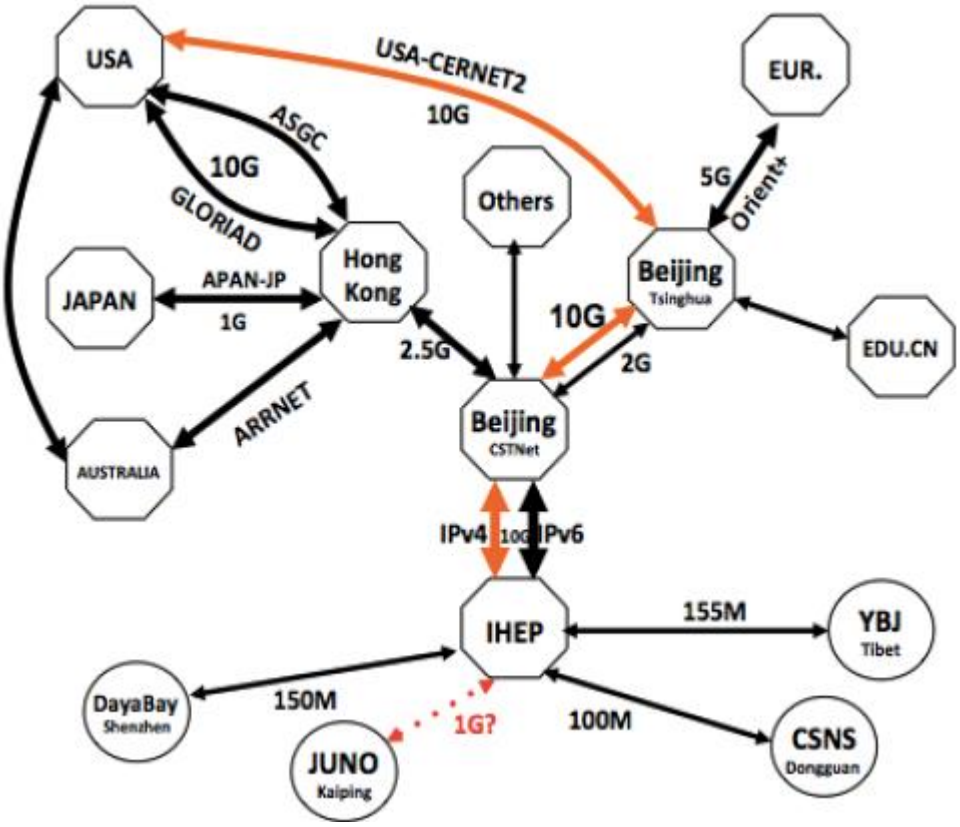


图 9-4 数据专线和网络连接示意图

江门中微子实验的国内和国际网络连接计划由中国科技网（CSTNet）提供，其数据流为江门中微子实验站现场先到高能所，然后经中国科技网同国内外合作单位实现互联互通。目前，高能所通过两条 10Gbps 链路（IPv4 和 IPv6）分别连接中国科技网核心网络，并经过中国科技网实现同美国 2.5Gbps、欧洲 5Gbps 以及内合作单位之间的高速网络连接。

9.3.1.2 网络信息系统安全

网络安全已经成为各类信息系统所必需面临的风险和威胁，江门中微子实验同样面临软件、数据、应用系统以及计算系统的安全风险。江门中微子实验网络信息系统安全将从物理

层、网络层、系统层、数据传输层、病毒威胁层和管理层等多个方面进行风险控制和安全防护。

物理层安全是整个网络信息系统安全的前提。一般情况下，物理层的安全风险主要表现为：电源故障造成的系统引导失败和数据库信息丢失；各种自然灾害导致的整个系统化的毁坏；电磁辐射可能导致的信息丢失；不同机密程度的网络没有物理隔离等。因此，要保证物理层的安全，在选择信息系统设备方面，将会选择满足国家安全标准的设备，同时与实际需求相结合，对重要的设备采用 UPS 不间断稳压电源供电；对特殊区域实现授权出入等安全控制措施。

网络层的风险主要包括网络边界和网络传输的安全风险。网络边界的风险控制将会在有外联服务要求的网络出口处安装防火墙的访问加以控制，并根据业务需求设置合理的安全访问控制规则。

网络传输的风险主要在于业务数据和实验数据传输层面方面的威胁，即数据窃听和数据篡改。对于实现数据的完整性方面，将通过在数据传输系统中增加文件内容校验以及多级数据缓冲的机制实现；对于敏感业务数据（文档共享、密码等）和应用系统将采用加密传输的方式避免明文窃听风险。

系统层的安全风险通常是指操作系统和应用系统的安全，主要有操作数据库安全风险、系统安全风险和桌面应用系统的安全等。江门中微子实验中，将通过严格的权限分级控制和操作日志审计减少和避免系统层的安全威胁。

病毒威胁方面，传统的病毒主要是通过各种存储介质进行传播的，而现在的病毒主要是通过网络实现传播的。当局域网内的一台客户机被病毒感染后，就会迅速的通过网络传播到同一网络的成百上千台机器。在江门中微子实验现场和离线的网络环境中，将对接入网络环境中的计算机实现安全访问控制和对用户终端进行实时检测，限制或者拒绝具有安全风险的终端访问江门中微子实验网络和信息系统环境。

管理层的安全风险则是由于网络信息系统管理的混乱、责任的不明确、制度的不健全以及非法操作等引起的。解决这一问题最为可行的方法就是管理制度和管理解决方案的相互结合，实现制度规范行为，技术控制行为的融合。

9.3.2 数据传输和分享

数据传输和共享是江门中微子实验物理分析的基础，在稳定的取数模式下，探测器所收集的数据通过网络从江门中微子实验站先传输到位于高能所计算中心的永久数据存储地点，然后根据实际需求从高能所计算中心自动分发到具有数据需求的合作单位。江门中微子实验的原始数据对所有的合作组成员开放，用于进行本地或者远程的处理和分析。

江门中微子实验原始数据由位于大亚湾实验站的在线数据获取系统（DAQ） 获取，然后存储到本地的具有足够空间（1 个月原始数据量的空间）的磁盘高速缓存上。磁盘高速缓存上的数据通过网络被传输到位于中国北京高能物理研究所计算中心的存储系统。网络传输的数据是否具有完整性将通过比较现场缓存文件和高能所存储系统中的文件实现，没有通过检查的数据需要重新进行传输。一旦数据传输和测试完毕，位于江门中微子的 DAQ 硬盘高速缓存上的原始数据将会被标记为多余的，然后通过高水位线/低水位线算法删除。该方案能够在暂时的网络中断或者数据传输工具暂时出现问题的情况下不丢失实验数据。

大部分实验数据的传输将被数据传输系统自动完成，从而可以把人为操作可能引起错误率降低到最低限度。为了保证数据传输系统的稳定性和健壮性，将会开发和部署数据传输监控系统，该系统提供数据共享和传输状态监视，实时跟踪和了解数据传输系统效率，结合包括网络带宽资源在内的基础设施状况，多方面综合分析，自动优化数据传输路径和自动恢复

数据传输故障，最大程度地提高实验数据传输的性能和稳定性。

9.3.3 计算和存储

9.3.3.1 本地计算集群

根据江门中微子数据处理的需求，在高能所计算中心将有 10,000 CPU/核用于实验数据的模拟、重建以及数据分析等计算。这些计算资源将被归入高能所计算中心的本地集群统一管理。根据江门中微子数据处理的实际需求，将建立具有不同优先级别的作业队列，共享所有计算资源。

针对江门中微子计算特点以及计算节点 CPU 性能，将开发优化作业调度算法，把作业调度到最合适的计算资源上运行，以保证作业的运行效率。

需要详尽分析江门中微子作业的计算模式和运算特点，根据作业对 CPU 的使用和对 I/O 带宽的使用情况，对计算作业的类型进行详细划分。研究各种类型计算作业以及各种类型作业数量在不同型号 CPU 上运行效果；并分析分布式存储系统的状态对作业运行速度的影响。

根据上述研究结果，基于集群在用调度软件，开发出相应的作业调度优化算法模块，作为作业调度软件算法插件，并与批作业管理系统整合，应用于江门中微子计算资源以及作业调度管理，以提高单个作业运行效率和集群整体资源使用率。

9.3.3.2 计算虚拟化

高能物理领域中，本地计算资源目前一般通过 Torque、Condor、LSF 等批处理调度系统直接将作业调度到物理机器上运行。但随着硬件的不断发展，CPU 的计算能力越来越强，通过虚拟机集群的使用可以弥补某一时期内江门中微子对数据处理计算资源的峰值需求不足情况。此外，操作系统与离线软件的版本也会是不断升级，为了可以灵活提供对不同软件版本计算资源的需求，减少系统管理负担，十分有必要进行计算节点的虚拟化。通过虚拟机的运行，可以完全屏蔽底层硬件的更新换代，灵活配置多种软件版本，并使计算作业保持原有运行方式。虚拟机集群的使用可以提高集群的可用性，可靠性，实现计算规模弹性扩展。资源分配。

将物理机集群的以节点为单位的资源分配方式转变为以 CPU / 核为单位进行资源分配。一个 CPU/核运行一台虚拟机，实际作业运行于虚拟机，虚拟机的生命周期取决于其上运行的作业的时间。这使得以分析数据为主要操作的江门中微子物理分析作业可以实现作业优先级抢占以及数据迁移。根据计算作业运行状态和计算节点的硬件状态，实现虚拟机的在线动态迁移和作业挂起，保证计算环境稳定运行以及作业顺利运行。

9.3.3.3 分布式存储资源管理与数据共享

江门中微子数据处理是典型的数据密集型计算，数据存储规模大，需要分布式存储资源管理，其框架如**图 9-5** 所示。

在物理设备层的基础上抽象出逻辑设备层，为上层应用提供稳定可靠的存储资源。逻辑设备独立于物理设备，彼此互相隔离，可以进行弹性伸缩、复制，并能够在物理设备间进行

迁移。同时，逻辑设备还具有不同的属性，比如高可靠性、高性能或者高安全性等，满足江门中微子的实际存储需求。逻辑设备层可以使存储系统具有非常强的可扩展性，实现 PB 量级的容量扩展。

存储管理层提供资源分配、资源调度、负载均衡等存储资源管理功能，并为上层应用提供了一个全局统一命名空间，这就是虚拟存储层，完全将底层的物理存储资源无缝整合为统一的虚拟存储资源，为用户提供透明虚拟存储资源。

分布式处理层在存储管理层之上，提供包括容错、一致性、分布式任务调度支持（比如支持 MapReduce 等）、元数据信息管理等功能。

应用接口层提供了丰富的应用接口，完全兼容 POSIX 语义，完全对应用程序透明，应用无需任何修改即可访问存储系统。

虚拟化分布式的存储系统完全可以满足江门中微子 10PB 的存储需求，提供可靠，高性能的存储服务。此外，可以按照实验的存储规模，弹性扩展。

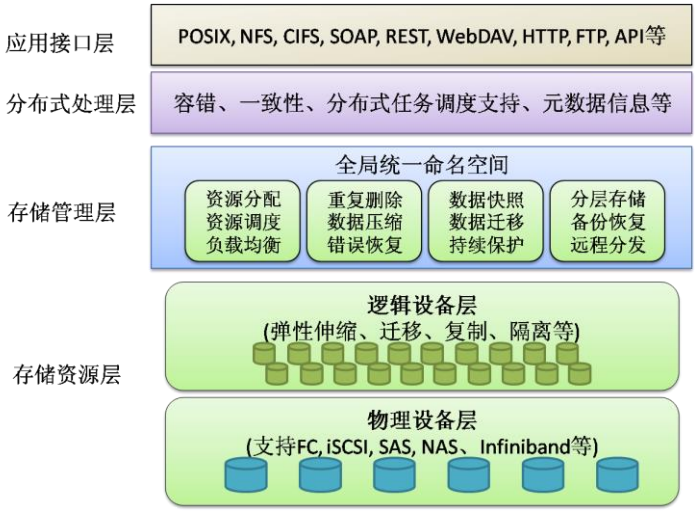


图 9-5 分布式资源管理框架图

9.3.3.4 分布式计算

江门中微子的计算规模巨大，需要多个合作组成员计算资源协同工作，共同完成。分布式计算技术将整合异构资源，实现不同地域站点间的资源共享。大规模分布并行处理系统提供统一接口接收用户作业，并将作业派发到各个站点。系统同时提供“作业推送”与“作业拉取”两种模式实现作业站点级别的调度。

9.3.4 运行管理与信息服务支撑平台

9.3.4.1 网络综合支撑平台

网络综合支撑平台是指用以满足江门中微子实验网络环境、计算环境、存储环境以及其它应用业务系统可靠运行的综合监控平台，建立并完善实验所需信息系统综合管理制度，为实验的 IT 基础设施和应用系统的高效、稳定运行提供制度和技术层面的保障。

该部分工作将会研究智能化综合监控技术，开发和部署面向新型数据中心的智能化综合

监控系统平台，基于 IT 基础设施库的运维流程，构建满足本实验信息系统平台运行质量保证的综合服务管理体系，构建完备的信息系统基础设施管理数据库，建立完善的信息系统平台基础设施管理和业务系统管理流程，提供统一的信息系统支持平台，完成信息系统监控平台、技术支持平台、设施管理流程以及业务系统管理流程的逻辑关联与统一，满足江门中微子实验信息系统综合运维和管理需求。

9.3.4.2 细粒度的监控与运行维护

江门中微子数据处理的计算规模巨大、计算设备众多，需要建立细粒度的监控系统以保证计算环境的健壮运行，监控系统要实时、直观、易用，具有简单故障自修复功能，对于无法自动修复的故障提供及时报警信息。基本架构如**图 9-6** 所示

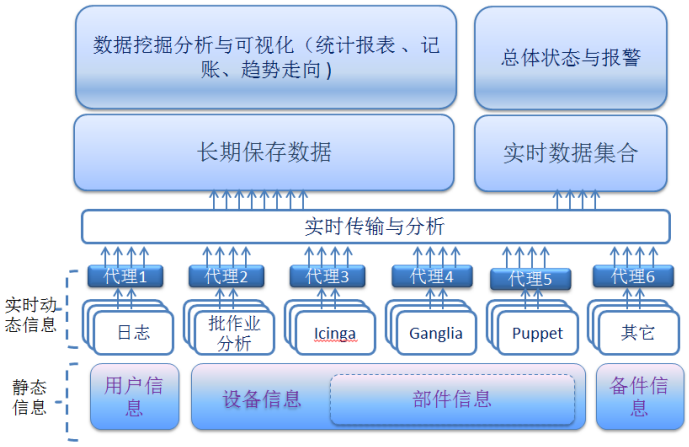


图 9-6 细粒度监视管理架构图

监控分为两个层次，单台设备监控和整体监控。

单台设备监控内容不仅包括设备的运行状态、健康状态以及使用效率，还包括该设备提供的所有服务状态信息。监控系统能够根据不同类型设备的具体情况，对影响设备及服务运行的所有因素进行监控。当设备的关键服务出现严重错误时，自动将其剔除出计算环境，把故障影响缩减到最小。

整体监控包括两方面内容，分别是实时状态监视和历史数据分析。实时状态监控实现对计算环境中所有设备和服务的状态进行实时分析整理，得到总体运行状态信息。历史记录分析完成收集并记录所有设备的运行历史记录，通过数据挖掘算法，同时间、环境等因素关联分析，发现潜在问题，探索发展趋势，保证计算环境强壮稳定运行。

9.3.4.3 科研信息服务平台

科研信息服务平台是指服务于江门中微子实验科研和管理需求的信息化系统。随着信息技术的发展，信息化应用和技术在科研活动中必将发挥越来越重要的作用，科研信息服务平台将会在江门中微子实验网站、wiki、会议管理、文档管理、协同办公、视频会议、学术报告直播 / 录播 / 点播、远程值班、IP 通讯、个人数据共享、成果共享以及科普宣传等各个方面为实验科研和管理人员提供系统服务。

9.4 进展和计划 （内容未定）2-3pages

9.5 软件开发流程和质量控制

江门中微子实验离线软件系统的开发人员由来自不同研究机构、大学的合作组成员组成，因此整个软件系统采用异地协同并行开发的模式。我们采用 subversion（svn）进行软件的版本控制和管理，搭建独立的 svn 服务器存储和共享开发人员的源代码，追踪工作进度，实现团队开发的目标。同时，采用 Trac 工具进行软件开发过程中版本性能规划、开发进度计划、软件缺陷追踪、专项指派以及交叉索引等管理功能，帮助开发人员开发出高质量的软件。

对于软件质量的控制，我们将制定严格测试和发布流程，开发专门的软件质量检查工具，实现从单个算法、软件包、子系统到整个软件系统的多个层次、全方位的自动检查机制，通过拟定的特征分布、CPU 使用率、内存消耗等指标检查每个软件版本的性能，跟踪不同版本的性能差异，保证软件的质量。软件测试完成后，将通过专门的工具进行自动编译和发布，供所有项目成员使用。

对于文档管理，采用 Wiki 和 DocDB 两种工具提供多种形式的文档资料。Wiki 网页提供离线软件和计算环境的每个研究课题的内容介绍和最新进展，以及软件用户使用指南；DocDB 数据库中将存放所用的工作文档和会议报告，供用户使用查询。

9.6　系统风险分析

9.7　组织、预算和经费

第10章　土建与通用系统

10.1 实验位置与布局

实验站位置选取需要满足下述条件：

（1）满足中微子实验厅与阳江核电站、台山核电站的距离及岩石覆盖层厚度要求。

（2）实验站布置充分考虑运行安全、管理方便、交通便利，满足实验站各项功能需要。

（3）工程建设充分考虑节能减排要求，尽量减少对当地生态环境的影响。

（4）水电接入条件便利。

（5）交通通道满足规程规范和实验设备运输要求条件下线路尽量短，规划合理。

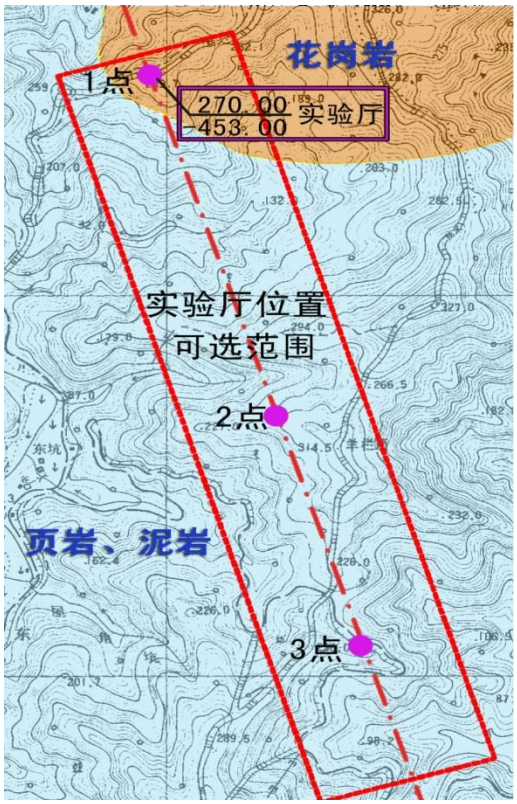
（6）园区充分考虑工艺使用要求并注重与自然地形有机结合，在现代绿色理念的模式下，更重视塑造一个花园式的园区，张弛有序的庭院式大广场设计，构成丰富的空间层次。

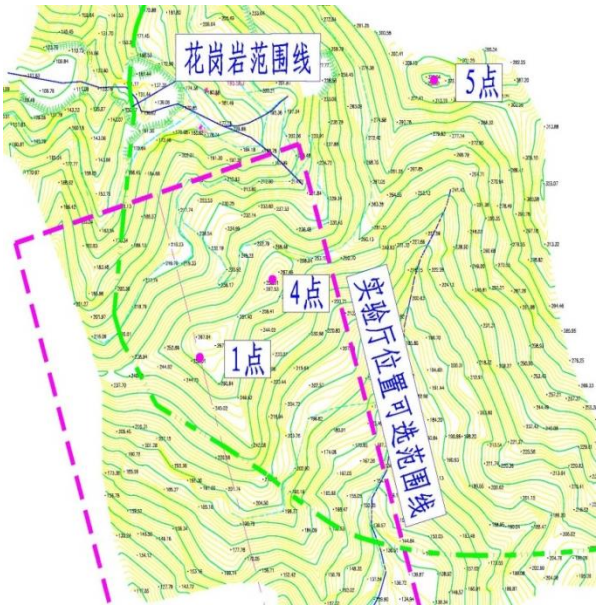
（7）满足国家现有相关规程规范的要求。

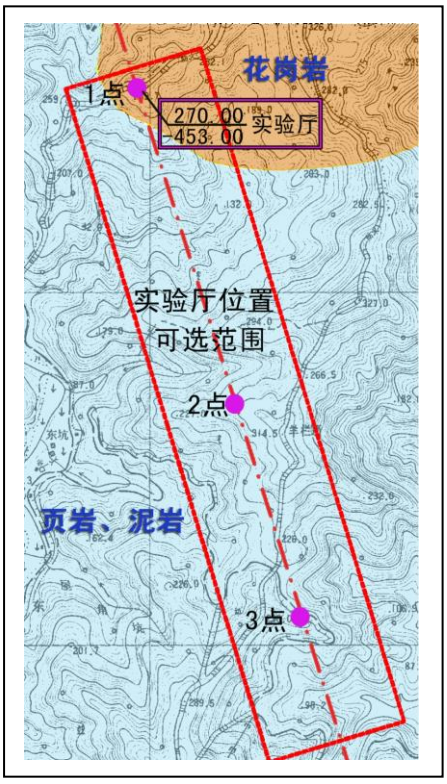
10.1.1 实验位置

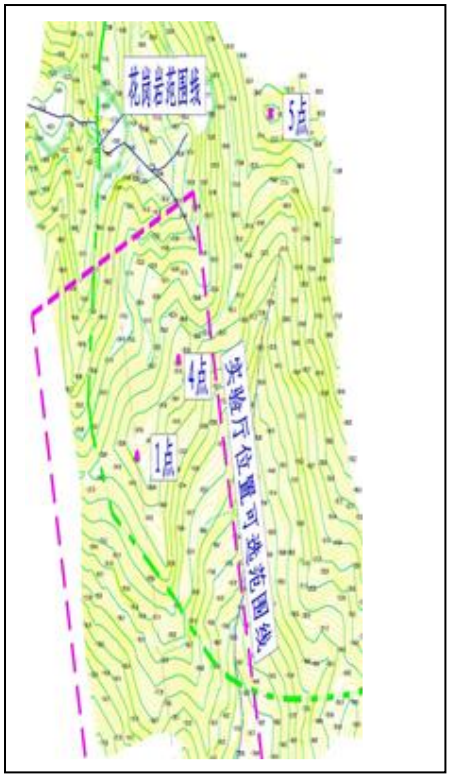
根据阳江 6 个堆、台山 4 个堆经纬度，确定满足物理要求的中轴线，安装有探测器的实验大厅的位置应处于距阳江核电站和台山核电站约 53 公里中轴线上，在该处长约 2000 米，宽约 200 米的区域内，埋深大于 700 米。在这基础上，就要考虑山体覆盖层的厚度，越高越好，还要考虑山体岩性，确保可以满足实验大厅稳定性的需求。

在图 10-1 和图 10-2 中，中轴线上三个点的高程分别是：230 米，210 米和 205 米。考虑山体岩性，又选择略远离花岗岩体边界高程为 268.8 米的一个点（位置 4）。位置 4 点作为实验厅初选位置。


花岗岩
1点
270.00
453.00
实验厅
实验厅位置
可选范围
2点
页岩、泥岩
3点


花岗岩范围线
5点
4点
1点
实验厅位置可选范围线



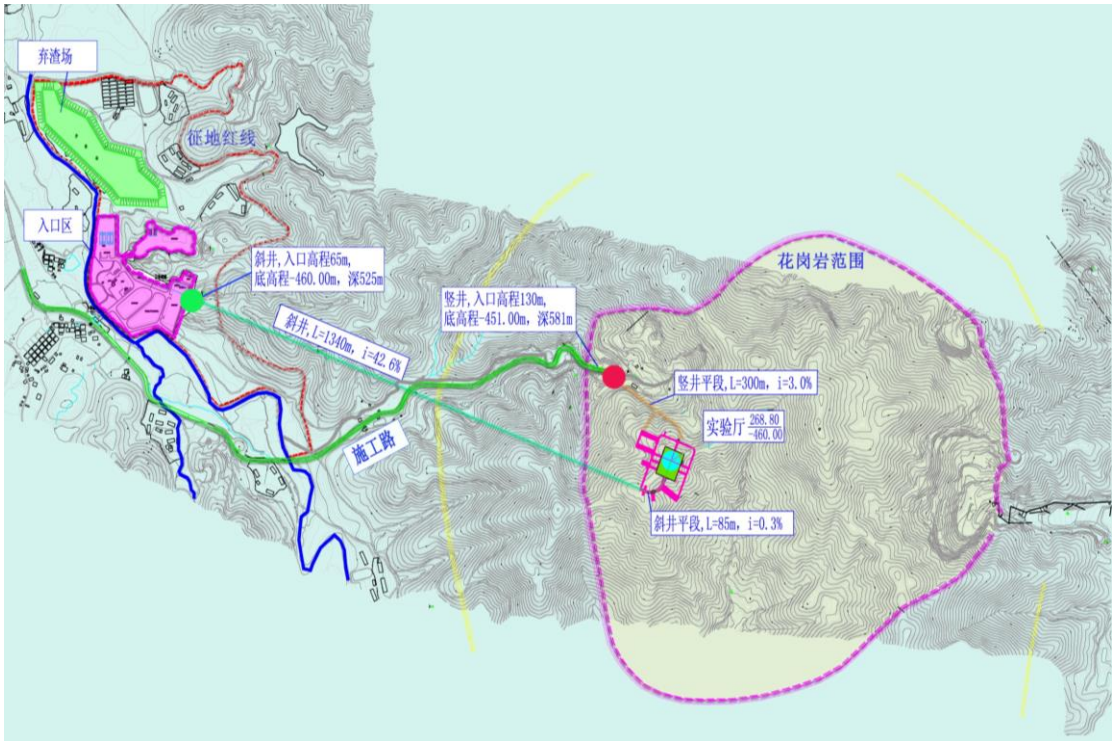


10.1.2 实验布局

实验厅位置确定后，需要考虑进入实验厅的隧道方案及进入洞口位置。安全要求必须有两个进入通道。因此，主要在两个方案中选择，“竖井+斜井”方案和“竖井+平洞”方案。平洞方案施工周期过长，8%坡度长达 6 公里隧道运输安全及方便性上也不具有突出优势。斜井方案施工周期短，采用轨道车满足人员及设备运行需求，安全可以控制。

图 10-3 为方案总布置图。其中，竖井深度 581 米，斜井长 1340 米，坡度 42.6%，实验厅埋深 728.8 米。斜井入口选择尽量靠近实验厅，处于花岗岩山体区域内，这些都有利于施工和通道的稳定性，现场查勘后，竖井位置在开平市金鸡镇废弃的东坑石场。斜井入口位置经过多个区域的比选确定的。由于地面建筑将布置在斜井入口区域，斜井入口位置既要考虑斜井施工、交通条件、又要考虑地面建筑及施工场地，同时，为了方便施工，减少对当地居民的干扰，考虑就近施工弃渣，综合满足这些要求的现场条件以及征地难度等因素，最后确定斜井入口临近开平市金鸡镇胜和村。

斜井入口区域（图 10-3）包括永久建筑区域、施工场地区域以及弃渣区。渣石集中堆砌在该区域，从竖井到该弃渣区不穿过临近村庄及家禽养殖场，避免影响当地生活及经济。集中弃渣也有利于水土保护及土地恢复。



10.1.2.1 地下洞室

地下洞室包括主实验大厅、附属洞室及连接隧道。

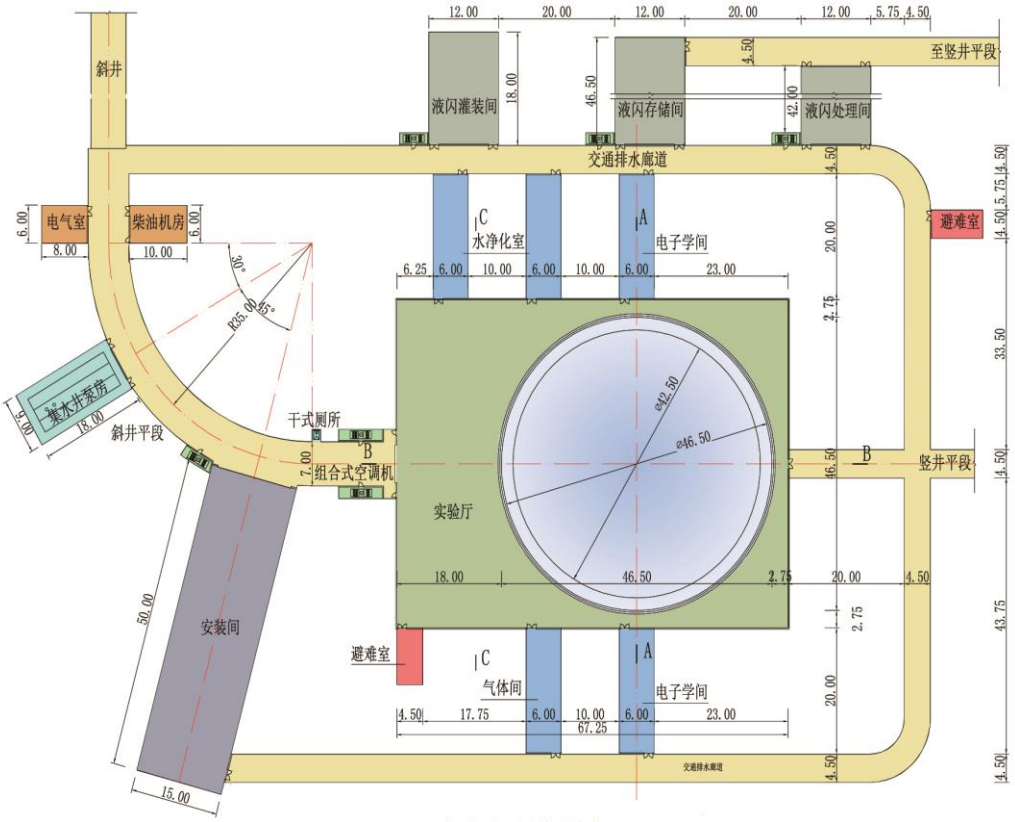
根据实验要求，实验厅水池内球形探测器罐直径 38.5m，水池内径为 42.5m，实验厅设计比选了穹顶方案和拱顶方案。综合比较工程量、造价投资、工期、洞室稳定条件、实验设备安装及运行管理，本阶段以为穹顶方案虽然投资少，但存在穹顶需设 2 台环形吊车，系统复杂，需专门设计定制，大件从安装间向水池转运不便等问题，因此综合考虑本阶段选择拱顶方案。，拱顶结构上部跨度为 48 米，拱顶起拱高度 17 米，地面水池边预留通行过道，一端预留 18 米长安装区间。

实验厅斜井平段侧布置安装间、集水井泵房和电气间。安装间靠近实验厅，便于移动设备，安装间长度为 50 米，跨度 15 米，高度 10 米。通过 7 米宽、6.5 米高隧道与实验厅和斜井想通。实验大厅内布置两台 20 吨/5 吨桥机，用于实验设备安装。安装间内布置 10 吨吊车，用于斜井货物装卸、设备吊装。

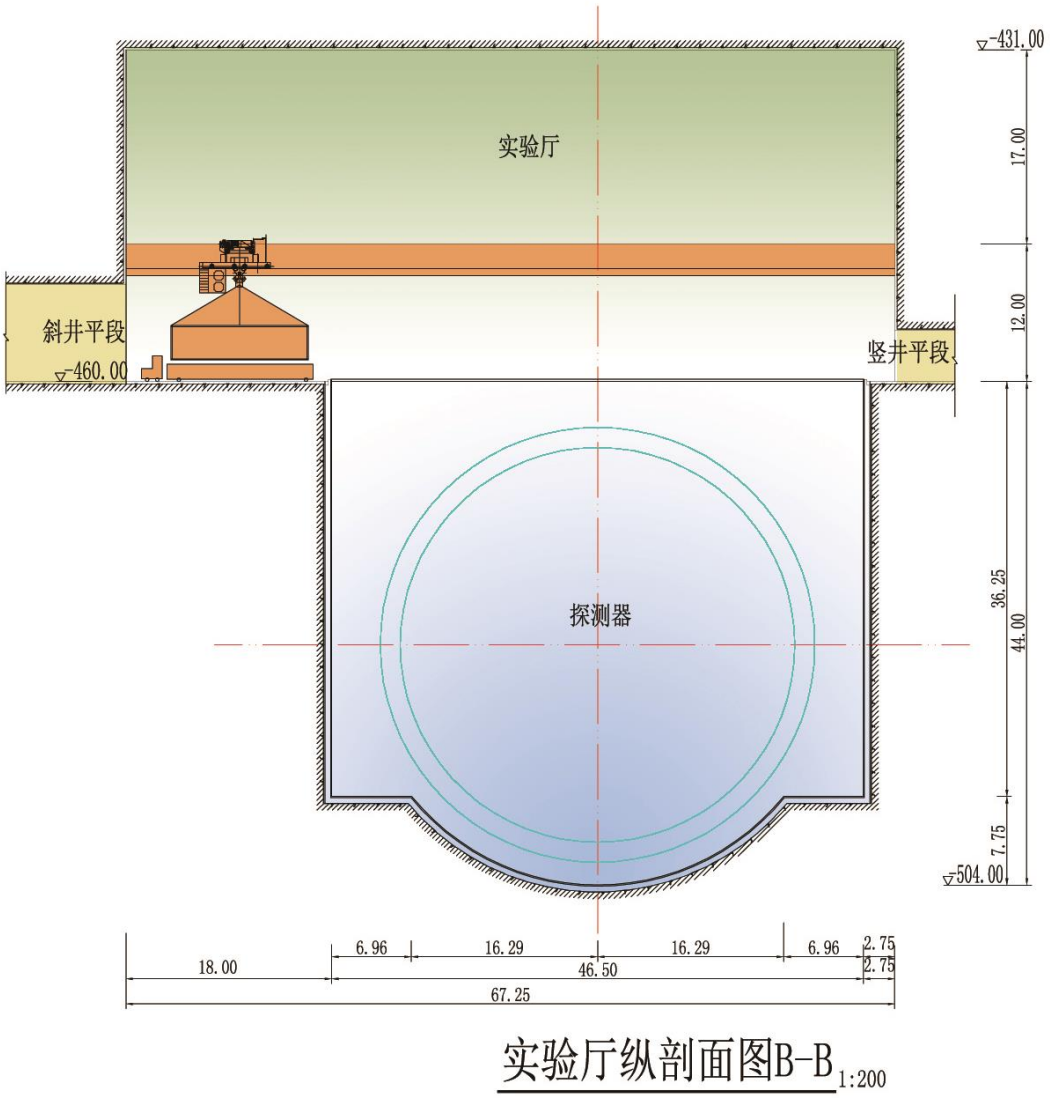
实验厅竖井平段侧布置液闪存储间、处理间和灌装间，远离实验大厅，有利于安全。实验大厅周围还布置有电子学间、水净化间、气体间和避难室。4.5 米宽环形交通排水廊道连接各附属洞室。

斜井隧道长 1340 米，宽度为 5.7 米，高度为 5.6 米，底部高程为-460 米，经长 85 米的平段隧道经安装大厅进入实验大厅。平段转弯半径为 35 米。斜井坡度根据施工机械扒渣机和规范要求，满足斜井隧道长度最短，综合确定为 42.6%（23.08°）。斜井运输设备为单滚筒绞车，提升速度为 4 米/秒。斜井一侧设有人行道，用于维护人员巡检及紧急情况下人员的撤离。斜井两侧墙壁布置电缆桥架、消防水管、空调水管和液闪管等，顶拱布置空调风管和送风管等。

竖井入口标高 130 米，深 581 米，底部通过长 300 米，坡度为 3%的平段隧道连接实验厅。断面 4.5 米 X5.2 米。竖井内安装一台罐笼，提升速度最大可达 6 米/秒，个容纳 8～10 人，主要用于人员出入。另外设有梯子间，作为紧急情况下人员的疏散，同时可以用于设备维修。竖井内还布置有通风排烟管和电缆井。



实验厅平面布置图 1:250



10.1.2.2地面布局

地面园区包括：斜井入口区、竖井入口区。由约 2.5 公里内部道路连接两个区域。
斜井井口有通风机房、电气室和出入房间。
斜井入口区为装配、办公和服务综合园区，与外部交通相连。该区域还设有弃渣场。施工完成后弃渣场需要恢复地貌。生活区靠近园区入口，设置永久房间 15 间（带卫生间），设置厨房（食堂），设备安装期设置 50 间、后期拆除，共 65 间。实验控制楼可设在生活区和装配区之间，包括 3 间控制室，8 间办公室，2 间会议室；装配区设在斜井入口处，2 个临时装配实验大厅每个 2000 平米，其中一个设置吊车，便于设备运输，一个与大亚湾 SAB 要求基本一致， 500 平米永久实验厅展厅（前期可作为装配或存储）；液闪区最好在远离生活区的地方，可设置在入口处的山谷区域，这个区域包括液闪储运罐和纯化，及氮气存储（80 平米），氮气存储可设在液闪区和斜井洞口之间。

10.2 地质勘查

10.2.1 区域自然地理概况

工程区附近主要有省道 S367 和 S275 通过，两镇距开平市距离约 40km～45km，镇村之间都有公路相通，交通较为便利（图 1.1）。

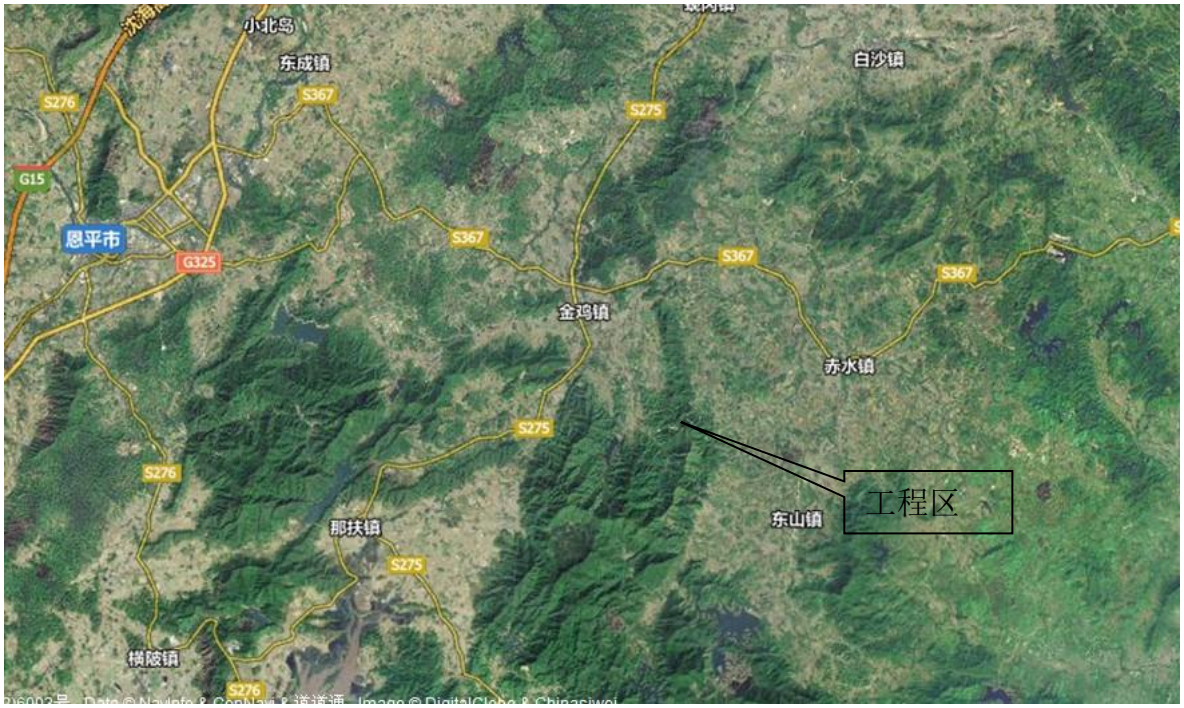


图 1.1　工程区交通位置图

工程场址区位于金鸡镇打石山一带，为低山丘陵区，山脉主脊走向近南北向。地面高程一般为 30m～300m，山坡地形坡度一般 10°～20°，地形最高点打石山顶，高程约 326m，为区内分水岭。最低为场址区东北部红星村一带，地表高程 30.0m。主要冲沟走向为近东西向，沟谷切割密度较大，切割深度 50m～100m，沟内多有常年流水。工程区最大河流——东坑河发源于东坑林场，流经工程区的胜和村一带，区内总体流向为近南北向，均为赤水河的支流。山脉东南侧分布有牛拗水库（小型）和多个塘堰。

工程区属东南亚热带海洋季风气候区，夏秋之交多强台风，台风带来充沛雨量，开平市区河流环绕，水域面积宽阔，冬无严寒，夏无酷暑，温和多雨。年均气温 21.7℃，湿度 82%，年降雨量 1700mm～2400mm，集中在 4 月至 9 月，每年 10 月至来年 2 月雨量很少，气候相对干燥。常年主导方向为东风。由于亚热带季风影响，每年 6 月至 10 月为强风季节，风力为东风 6 级至 9 级。

工程区属潭江水系，潭江在开平地区流向自西向东，工程区主要为其一级支流白沙河（赤水河）和蚬岗河，两条河在工程区流向主要为近南北向，河流的

次一级支流众多，规模不大，一般河宽 10m～20m，水深大部分小于 1m，常年流水，形成了河流密布，水资源极为丰富的地域特色。工程区分布有众多的中小型水库和塘堰，主要有中型水库狮山水库，小型水库西坑水库、牛拗水库。

本区的活动性断裂主要有恩平—新丰断裂带，距离工程区约 60km，该断裂在明城附近曾发生 6 级地震，开平附近多次发生 4 级以下地震，鹤城一带曾发生 4 级地震。高明附近断裂热释光测年值为 24.52 万年，对鹤城-金鸡断裂热释光测年值为 15.33 万～35 万年，属中更新世活动断层。

根据中国地震台网（CSN）地震目录，工程区 150km 范围 1970 年以来内共发生大于 3.0 级 64 次（见图 2.2），其中大于 4.75 级的中等强度地震仅 3 次；近场区（25km）没有大于 4.0 级地震。从工程区地震分布图上看地震主要分布在工程区西南部阳江一带。工程研究区范围内最大地震为 1995 年 3 月 26 日发生在南海的 4.9 级地震，该地震震中距工程区大于 100km，对工程区影响较小。

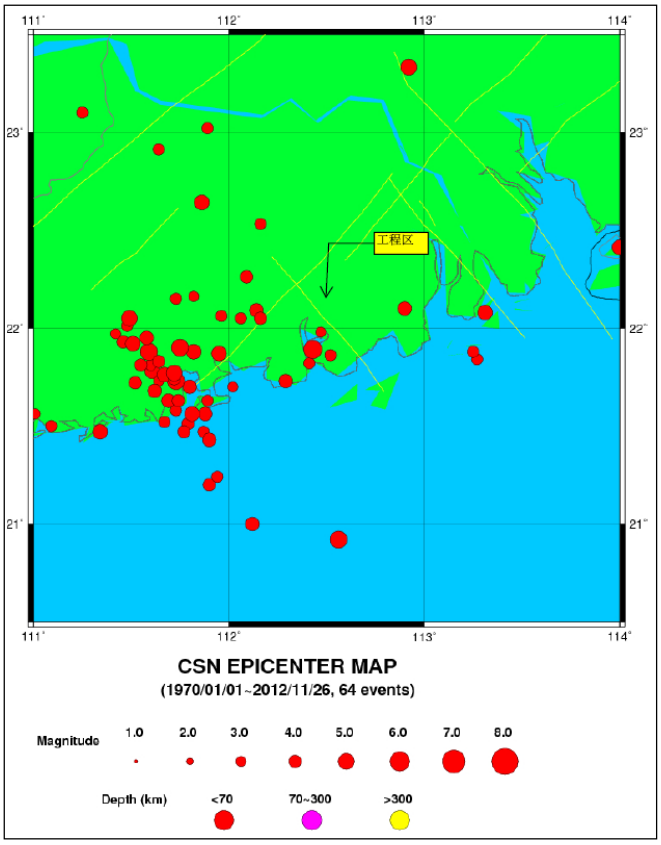


图 2.2　工程区（20.5～23.5，111.0～114.0）1970 年以来大于 3.0 级地震分布图

根据《中国地震动参数区划图》（1：400 万），工程区 50 年超越概率 10%地震动峰值加速度为 0.05g（见图 2.3），地震动反应谱特征周期 0.35s，相应的地震基本烈度为Ⅵ度。

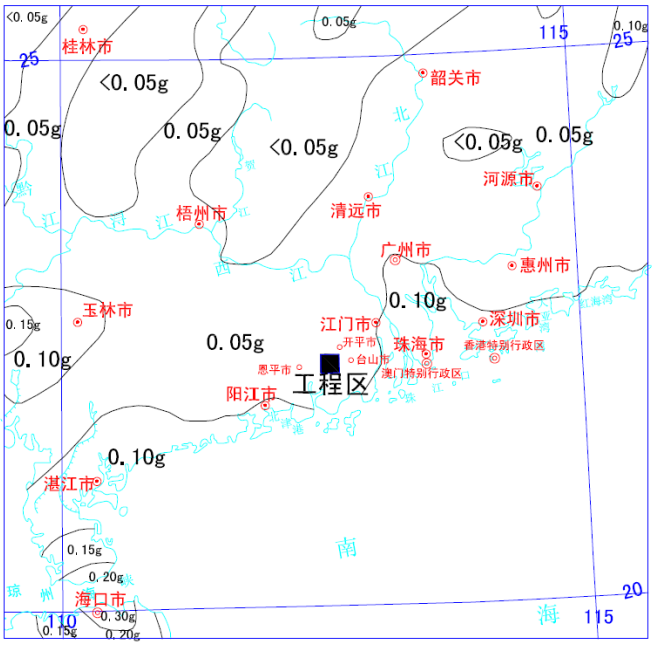


图 2.3　　工程区地震动峰值加速度区划图

10.2.2 地质勘察

为查明工程区的主要建筑物工程地质条件，为工程设计和施工提供地质依据，对主要工程地质问题的处理建议， 2013 年实施对实验站斜井、竖井区域及实验厅区域进行详细地质勘察。勘查内容包括：

1）查明场址区地形地貌、沟谷发育及集汇水情况，进行工程区岩体风化带划分，查明风化带厚度、囊状风化的发育特征和工程地质特征。

2）查明场址区地层岩性、岩组特征、岩体结构、软弱夹层、花岗岩体及接触变质带的空间分布特征和岩体完整性。

3）查明场址区地质构造特征，包括断层、褶皱、节理裂隙带、接触变质带、蚀变带等各种结构面的产状、性质、规模、空间分布及组合关系，分析其对洞口边坡和洞室围岩稳定性的影响。

4）查明场址区水文地质条件，包括地下水类型、水位和地表水的关系及连通条件，查明岩体的渗透特性和渗透系数，估算地下洞室的最大涌水量，预测开挖掘进产生突（涌）水（泥）的可能性，预测外水压力水头并评价其对地下洞室围岩稳定性的影响，查明地下水对建筑物的腐蚀性，提出处理措施建议

5）查明影响工程场址及施工场地的不良地质作用类型、性质和分布，评价其对场址的影响，提出预防措施建议。

6）进行岩石和岩体物理力学试验，提出岩石的物理力学参数、岩体的强度和变形参数。

7）进行钻探岩芯 RQD 统计和声波测试。开展围岩工程地质分类和岩体质量分级，提出各级围岩物理力学参数和工程开挖、支护建议。

8）进行地应力测试，尤其是实验厅处主应力作用方向及大小，分析其对围岩稳定性的影响。

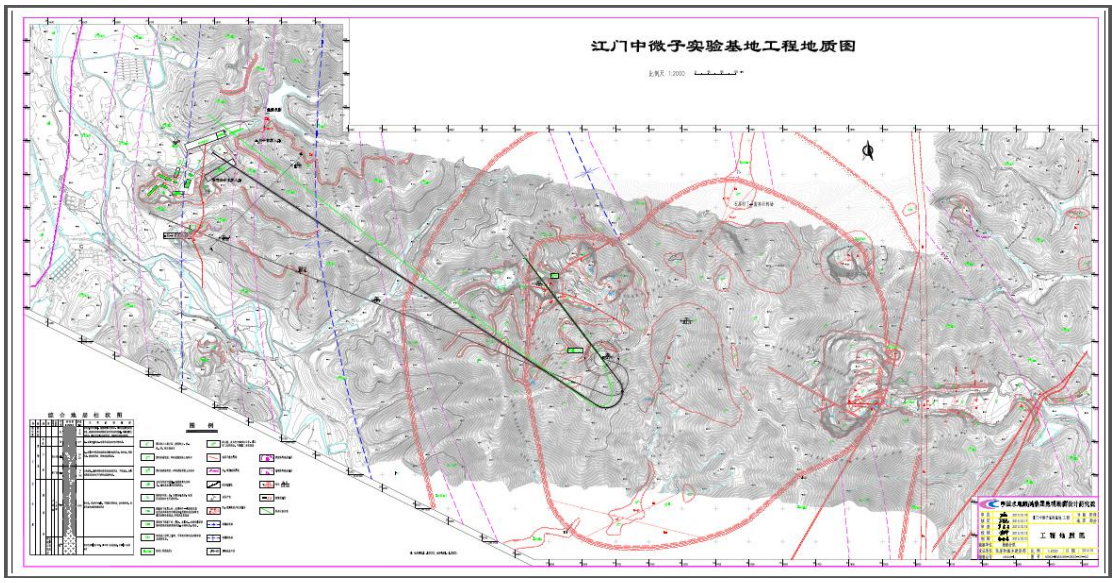
9）进行地温、放射性、高压压水、钻孔弹模、岩石放射性、电阻率、钻孔电视等专项测试，查明有害气体、放射性元素和地温的赋存变化情况，分析其对工程的影响，提出预防建议。

10）在查明场区工程地质条件的基础上进行工程地质评价工作，重点评价围岩的稳定性和开

挖边坡稳定性。围岩稳定性评价须采用多种围岩工程地质分类，并进行块体稳定分析。
11）对施工中可能遇到的高应力、高地温、突（涌）水（泥）及高外水压力等特殊工程地质问题进行分析预测，并提出防治处理建议。

10.2.2.1 实验站区域地质条件

实验站区域地质情况见图 10-xxx. 实验厅所在的中心区域为花岗岩，围绕该区域外围为角岩，最外主要为砂岩。



10.2.2.2 斜井工程地质条件

斜井入口位于胜和村东北方向约 400m 的一个宽缓的沟谷内，入口处植被茂密，入口位置前方地形开阔，便于组织施工和布置地面建筑（见图 4.1）。斜井段高差 523m,水平投影长约 1250m,坡度 23.5°，中间设置两个缓冲平段，开挖断面为城门洞型，缓冲平段断面为 10m×8m，其余地段断面衬砌后内径为 7m×6m。斜井洞身通过地段分布的基岩主要有奥陶系新厂组（O_1x）地层、寒武系八村群∈bc^c 亚群地层、角岩和花岗岩。

图 4.1 斜井入口地形地貌

斜井入口处沟谷的主沟上游有一座山塘水库（见图 4.1），该水库库容为 $5\times10^4m^3$，规模小，上游无河流补给，其水源主要靠大气降水及地下水排泄补给，水库的汇水面积约为 $0.3km^2$，故即使在雨季，水库的来水量也不会很大，不会形成大的泄洪。水库坝后有两条泄洪渠，泄洪渠距斜井入口最近距离约为 130m，高程比洞口低约 5m，而泄洪区下游为地势更低、更开阔的平原区。综上所述，该山塘水库雨季泄洪不会对斜井入口产生影响。

斜井洞口处地形较平缓，进口底板高程为 70.00m，进口开挖边坡高度约为 9.0m。根据勘察成果，洞口处覆盖层为粉质黏质碎石土，厚 1m～3m，基岩主要为新厂组（O_1x）灰、灰黑色粉砂岩夹长石石英砂岩及泥质页岩，产状为 N6°E，SE∠58°，全风化，局部强风化，岩体破碎，呈散体结构，开挖后可产生圆弧型破坏。由于进口边坡高度小，且为逆向坡，覆盖层薄，稳定条件一般。建议洞脸边坡开挖坡比为 1：0.75。由于工程区降雨较多，开挖施工中，需及时进行护坡处理。

根据勘察资料，结合水利水电分类标准、Q 系统及 RMR 围岩分类标准，对隧洞围岩分类预测评价如下：

（1）1+413m～1+350m 段，属进口段，隧洞围岩岩性以粉砂岩为主，局部为石英砂岩及泥质页岩，全～强风化，部分弱风化，节理及挤压面发育，泥质充填，碎裂结构为主，部分为镶嵌碎裂结构，洞顶及边墙有渗水或滴水。RQD=0～15%，经计算，围岩水利水电 T 值为 19，Q 值为 0.13，RMR 值为 10.3，围岩类别为Ⅴ类。洞室稳定性极差，无自稳时间或极短，开挖中拱顶出现岩块冒落、边墙产生塑性变形情况。

（2）1+350m～1+283m 段，隧洞围岩岩性以粉砂岩、石英砂岩为主，弱～微风化，节理及挤压面较发育，镶嵌碎裂结构为主，部分互层状结构。洞顶及边

墙有渗水或滴水。RQD=30%，经计算，围岩水利水电 T 值为 32，Q 值为 0.99，RMR 值为 31.5，围岩类别为Ⅳ类。洞室围岩不稳定，自稳时间短，规模较大的各种变形及破坏均可能发生。

（3）1+283m～0+808m 段，隧洞围岩岩性以石英砂岩为主，局部为粉砂岩，微风化，节理较发育，镶嵌结构为主，部分层状结构。洞顶及边墙有渗水或滴水。RQD=50%，经计算，围岩水利水电 T 值为 59，Q 值为 6.6，RMR 值为 49，围岩类别为Ⅲ类。洞室围岩局部稳定性差，可能产生掉块现象。

（4）0+808m～0+418m 段，隧洞围岩岩性为角岩，微风化，节理较发育～不发育，层状结构。洞顶及边墙有渗水或滴水。RQD=60%，经计算，围岩水利水电 T 值为 64，Q 值为 14.85，RMR 值为 57，围岩类别以Ⅲ类为主，局部Ⅱ类。洞室围岩总体稳定性较好，局部完整性较差的部位可能会掉块。

（5）0+418m～0+000m 段，隧洞围岩岩性为花岗岩，微风化，节理不发育，块状结构。洞顶及边墙有渗水或滴水。RQD=90%，经计算，围岩水利水电 T 值为 83，Q 值为 36，RMR 值为 73，围岩类别为Ⅱ类。洞室围岩稳定性好，围岩整体稳定，不会产生塑性变形，局部可能产生掉块。

地下洞室涌水量的预测较为复杂，采用的主要方法有水均衡法、地下水动力学法、比拟法、数值模拟法等。本次勘察采用地下水动力学法对斜井的初期最大涌水量进行预测，采用水均衡法对斜井的稳定涌水量进行预测。

（1）初期最大涌水量预测

按大岛洋志法计算的最大初期涌水量约为 4359m^3/d。

（2）长期（稳定）流量预测

根据区调资料，斜井所在区域地下水径流模数约为 10 L/s.km^2，即约为 864 m^3/（d.km^2），斜井通过含水体地段的集水面积约为 1.6 km^2。经计算，斜井稳定涌水量约为 1382m^3/d。

10.2.2.3 竖井工程地质条件

竖井位于东坑石场沟谷内，竖井深约 589m，底高程-457m，竖井内径为 6m。

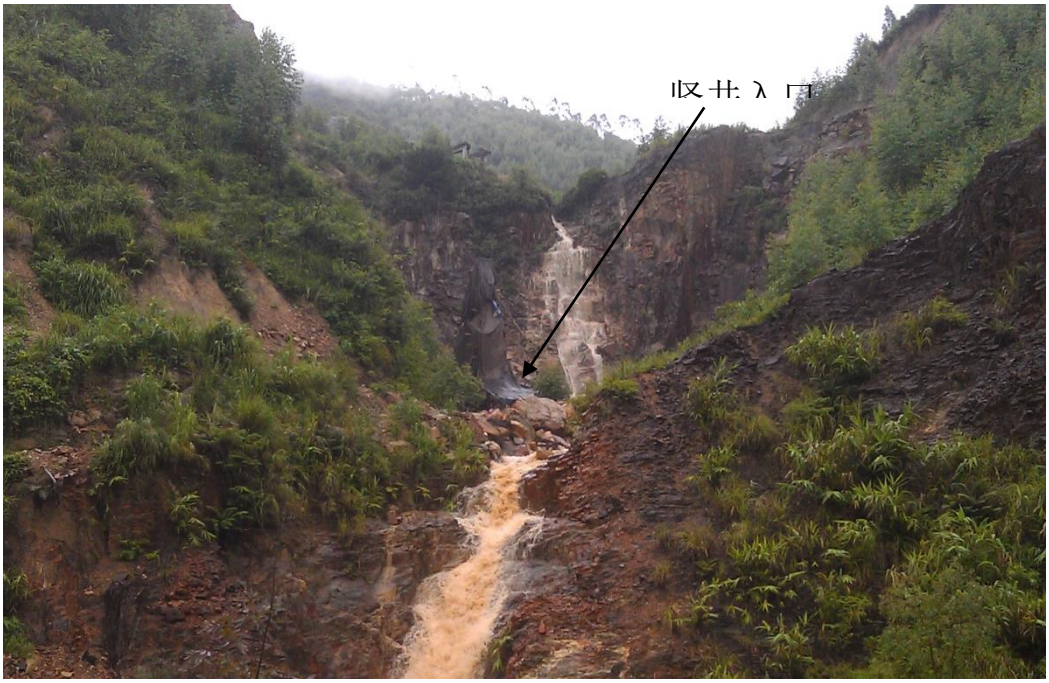


图 4.2 竖井入口处地形地貌及地表水情况

竖井处于冲沟沟心内（见图 4.2），该冲沟上游汇水面积约为 0.1km²，雨季时，冲沟内会产生较大的山洪，而冲沟上游有石料场开挖弃碴堆积，山洪可将弃碴冲到沟内，影响竖井施工及运营安全，建议在冲沟上游设置引（截）排水措施，保护竖井施工及运营安全。

竖井位于花岗岩区内，本次勘察的深孔 ZK1 就布置在竖井处，并在深孔内进行了地应力测试、高压压水试验、点位电阻率测试、自然咖马测试、钻孔电视、声波测试和地温测试等多项测井工作，各项测试成果详见上文相关部分内容或附件报告。

竖井距花岗岩侵入边界较近，在该区域内的节理裂隙及断层较发育，在地表附近见 5 条不同规模的断层出露，在钻孔内揭露到 11 条规模不等的断层或挤压带。

根据钻探揭露，竖井口有采石场弃碴，厚度 6.2m，弃碴结构松散，建议将弃碴全部清除。

根据勘察资料，结合水利水电分类标准、Q 系统及 RMR 围岩分类标准，对竖井围岩分类预测评价如下：

（1）井口 130 高程～120m 高程段：为竖井进口段，段长 10m，岩性为花岗岩，弱风化为主，仅井口约 3.6m 为强风化，节理裂隙较发育，镶嵌碎裂～块状结构，边墙有渗水或滴水。RQD=70%，经计算，围岩水利水电 T 值为 34，Q 值为 0.5，RMR 值为 38，围岩类别为Ⅳ类。洞室围岩稳定性差。

（2）107m 高程～-188m 高程段：岩性为花岗岩，微风化为主，局部弱风化，根据钻孔揭露露，本段发育多条小的断层和挤压面（Ⅳ级结构面），次块状结构为主，局部块状结构，边墙有渗水或滴水。RQD=80%，经计算，围岩水利水电 T

值为 60，Q 值为 7.5，RMR 值为 52，围岩类别为Ⅲ类。围岩局部稳定性差，井壁局部可能发生掉块。

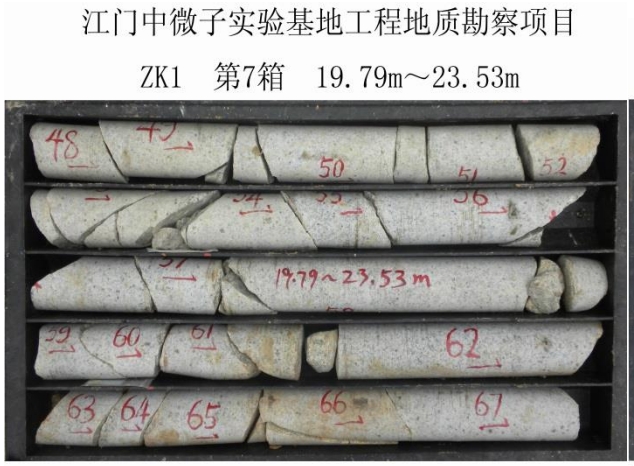
（3）-188m 高程～井底段：岩性为花岗岩，微风化～新鲜，岩体完整，块状结构，局部次块状结构，边墙有渗水或滴水。RQD=90%，经计算，围岩水利水电 T 值为 74，Q 值为 22.3，RMR 值为 64，围岩类别为Ⅱ类。井壁围岩稳定性好，围岩整体稳定，不会产生塑性变形，局部可能产生掉块。

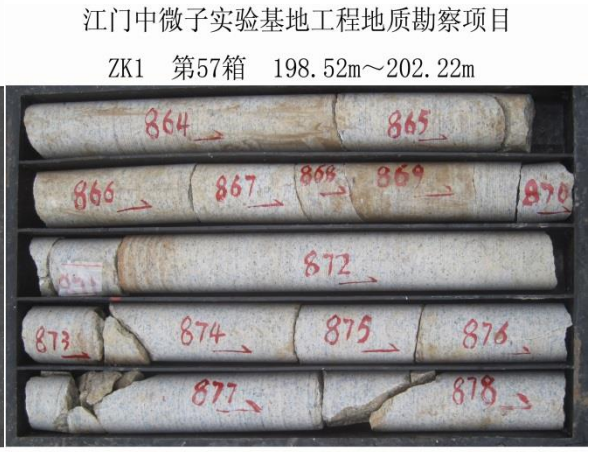
竖井涌水量根据裘布依理论公式进行预测：

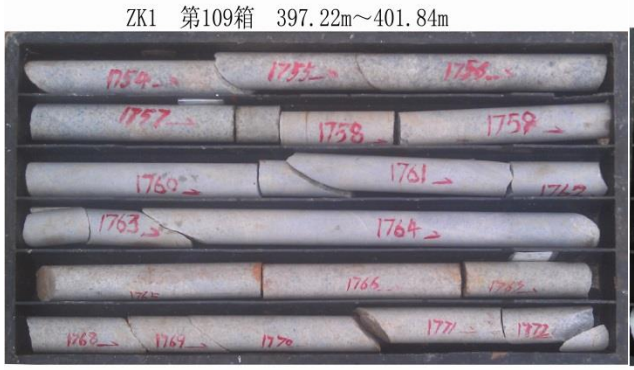
根据压水试验成果，竖井岩体渗透性系数约为 0.009 m/d，井深约 589m，竖井半径为 3m。经计算，竖井涌水量约为 1473 m^3/d。

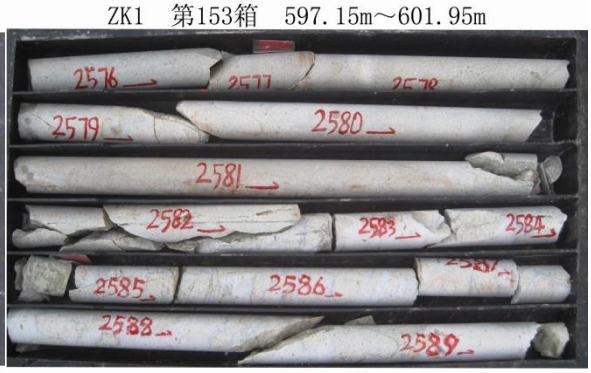
水平连接段为竖井与实验大厅之间的连接通道，长约 246m，开挖断面为城门洞型，断面为 5m×4.5m。连接平段岩性为花岗岩，微风化～新鲜，初步分析，在距离竖井 102m～107m 段，F_2 断层可能穿越竖井平段，断层影响带内围岩类别为Ⅳ类，其余平段围岩类别为为Ⅱ类。

根据地质调查成果，F_2 断层为压扭性平移逆断层，产状：N20°～55°E，SE∠59°～90°，产状变化较大，主要在花岗岩岩体内发育，宽 0.5m～3.0m，延伸约 400m，在地表，断层带主要由片状岩、糜棱岩、碎裂岩及透镜体组成，见倾斜擦痕，胶结差～中等。根据 ZK1 钻孔揭露，深部的断层带多为石英充填，胶结一般好～很好，多呈愈合状。在水平连接段 F_2 断层埋深约 660m，推测 F_2 断层深部胶结好～很好。F_2 断层所在地段无地表水体，且靠近地表分水岭，而分水岭山体较单薄，岩体透水性弱。综上所述，推测 F_2 断层带透水性较弱，且来水水量较少，水平连接段开挖至 F_2 断层后，断层处不会发生大的涌（突）水现象。按大岛洋志法计算的最大初期涌水量为 1072m^3/d。按落合敏郎法计算的长期（稳定）涌水量为 927m^3/d。









10.2.2.4 试验大厅工程地质条件

实验大厅位于竖井西南侧约 270m 的小山包地下，地表高程约 268m，埋深约 763m，地貌上为山脊，实验大厅上部竖直段高 10m，跨度为 51m，下部最大净空直径 46.5m，开挖直径 48.8m，深 42.15m，规模巨大。实验大厅布置于花岗岩岩体内，岩性为灰白色中细粒二长花岗岩。在平面上，实验大厅相对靠近侵入小岩株的中心地带。主要工程地质问题包括：

（1）地应力及岩爆分析

根据室内试验成果，微（新）风化花岗岩容重约为 $26.6\times10^3 kN/m^3$，饱和抗压强度一般为 80 MPa～120 MPa，平均值为 97MPa。，实验大厅最大埋深为约为 763m，根据地应力测试成果，估计实验大厅处地应力值不超过 20MPa，岩石强度应力比 $\frac{R_b}{\sigma_m}$=4.85。ZK1 钻孔打出的深部岩芯完整性好，在孔底（埋深约 651m）的岩芯仍呈长柱状（见岩心相片集）。实验大厅相对靠近侵入岩岩株中心，推测该处岩体完整性好，经综合分析，该部位应力中等，不致产生大的岩爆现象。

（2）外水压力分析

根据 ZK2 压水试验及 ZK1 高压压水试验成果，工程区弱风化及以下的花岗岩透水率一般小于 1Lu，岩体透水性为微透水。ZK2 内地下水位埋深为 186m，高程为 82.64m，实验大厅最底部底板高程为-495.15m，地下水位至底板高差为 577.79m。根据《水利水电工程地质勘察规范》附录 W，微透水岩体外水压力折减系数为 0.1～0.2，则实验大厅承受的有效外水水头仅约为 58m～116m，相应压力为 0.58MPa～1.16 MPa。根据高压压水试验成果，花岗岩的节理裂隙绝大部分在外水压力作用下没有发生变化，多属紊流型，少部分为充填型，未发现扩张或冲蚀现象。综上所述可知，实验大厅处的外水压力较小，外水压力对实验大厅的洞室稳定性影响小。

（3）洞室涌水分析

采用地下水动力学法对实验大厅的涌水量进行预测。

1）初期最大涌水量预测

初期最大涌水量采用两种方法预测，分别为大岛洋志法和经验公式法。

a）大岛洋志法：

根据压水试验成果，深部花岗岩为微透水岩体。按大岛洋志法计算的最大初期涌水量为 395 m^3/d。

b）经验公式法

经验公式法计算的最大初期涌水量为 527 m^3/d。

2）长期（稳定）涌水量预测

长期（稳定）涌水量采用两种方法预测，分别为落合敏郎法和经验公式法。

a）落合敏郎法：

按落合敏郎法计算的长期（稳定）涌水量为 244m^3/d。

b）经验公式法

经验公式法计算的长期（稳定）涌水量为 120 m^3/d。

综上计算分析可知，实验大厅的初期最大涌水量及长期（稳定）涌水量较小。

（4）地温

根据 ZK1 内地温测试成果，450m（-314m 高程）深度以下地温为 31℃～32℃，不存在高地温问题。

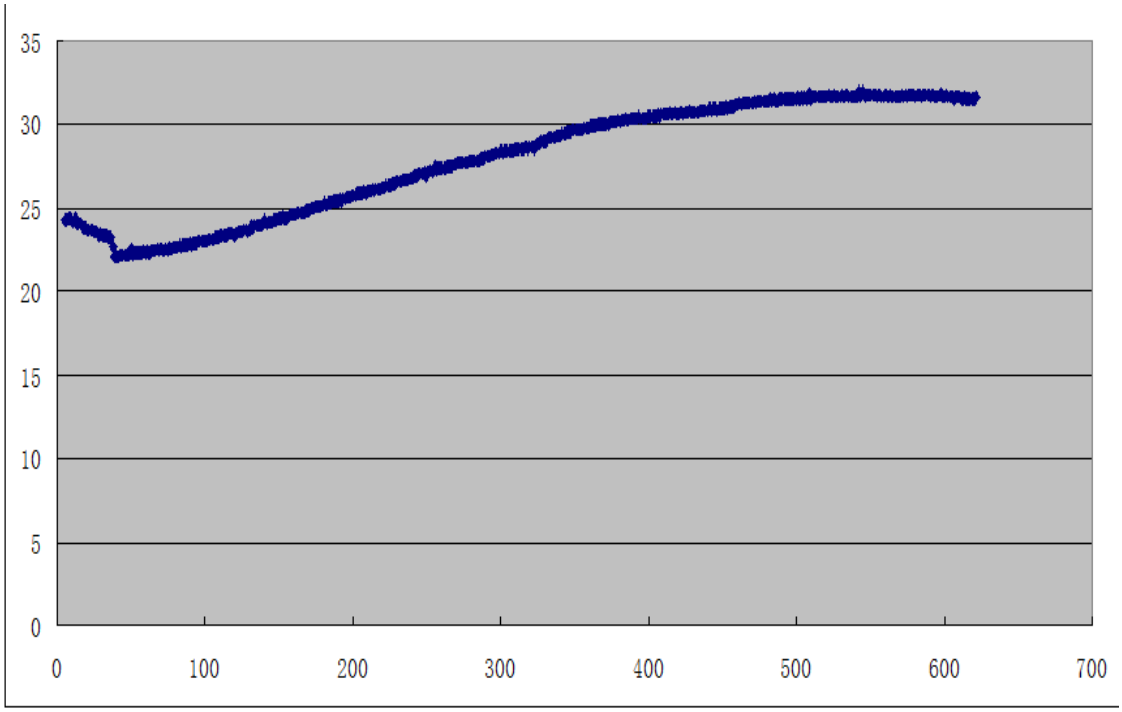


图 10-1

10.2.2.5 围岩稳定性评价

实验大厅跨度为 51m，可分为上下两部分：上部洞室为拱部及连接拱部的 10m 高边墙（垂直段），主要用于安装吊装设备及网架通道等其他设备；下部洞室为井筒，开挖直径为 48.8m，高 42.15m，用于安装液闪罐等设备。根据可研设计资料，实验大厅上部洞室拟定了两个比选方案：拱顶方案及穹顶方案，这两个方案的井筒部分相同。实验大厅周边设有安装间、液闪储存间、水净化室、连通廊道等附属洞室。实验大厅工程规模巨大，结构较复杂，本文分别对实验大厅的上部洞室及下部井筒、附属洞室的围岩类别进行分析。

1）上部洞室

A）拱顶方案

拱顶方案拱顶跨度为 51m，洞轴方向为 N37°W，长 55m，拱顶高 18m，边墙高 10m。洞室围岩岩性为花岗岩，微风化，块状结构，主要发育陡倾节理，缓倾及中倾节理局部发育，节理面平直，粗糙，一般紧闭无充填，少量微张～张开，充填岩屑或高岭土膜，局部渗水或滴水。岩石饱和单轴抗压强度为 97MPa，RQD=90%，Kv＞0.75，经计算，围岩水利水电评分 T 值为 82；Q 系统围岩分类参数值：RQD=90%、Jn=6、Jr=1.5、Ja=0.75、Jw=1、SRF=1，经计算 Q=30； RMR 围岩分类值为 73，围岩类别综合判定为Ⅱ类。

洞室围岩稳定性好，围岩总体整体稳定，但是实验大厅跨度大，在三组陡倾节理的相互切割下，可能形成局部不稳定块体。

根据地应力测试成果，最大水平应力方向为 N10°W～N54°W，由于拱顶方案上部洞室近似正方形，地应力对洞轴线的选择无大的影响。各方向地应力差值较小，对边墙稳定性影响不大，鉴于本工程洞室跨度大，地应力呈“静水”状态，洞室的重分布应力较复杂，因此，应进行必要的稳定性复核，并采取适当工程措施。

B）穹顶方案

穹顶方案跨度与拱顶方案的相同，为 51m，拱高 18m，其与拱顶方案不同之处为其在水平面上的投影为圆形。穹顶方案地质条件与拱顶方案相同，围岩类别评分相同，围岩类别也为Ⅱ类。洞室围岩稳定性好，围岩整体稳定。

穹顶方案的洞型对地应力有较好的适应性，对应力场扰动相对较小。根据 unwedge 分析成果，在三组节理切割下，跟拱顶方案类似，穹顶局部会出现不稳定块体，但块体规模较小，其最大不稳定块体不会大于拱顶方案的最大不稳定块体。

拱顶方案与穹顶方案的工程地质条件没有本质区别。

2)下部井筒

井筒开挖直径为 48.8m，高 42.15m，其围岩岩性、节理发育情况及地下水等地质条件与上部洞室的相同，但是在水利水电围岩评分中，由于主要节理为陡倾，其与边墙形成不利组合，围岩水利水电评分 T 值为 74；Q 系统和 RMR 围岩评分与穹顶的相同，分别为 30 和 73。围岩类别综合判定为Ⅱ类。洞室围岩稳定性好，围岩整体稳定。

3）附属洞室

附属洞室规模相对较小，开挖断面为城门洞型，其中开挖断面最大的是安装间，为 15m×11m。附属洞室的地质条件与实验大厅的相同，其围岩类别也为Ⅱ类。洞室围岩稳定性好，围岩整体稳定，但在附属洞室与实验大厅交接地方，及附属洞室之间的交岔处，需加强控制爆破，尽可能保护交岔处围岩的完整性及稳定性。

10.3 通用系统

配电和地线。外部将提供两回路 10kV 线路到斜井和竖井动力中心，各来自不同公用电网的金鸡镇 110kV 变电站和赤水镇变电站。满足各自独立的要求。地下还设有一座 10kV 动力机房，为地下设施提供电力。常规供电外，动力中心还各自配备相应的自启动柴油发电机，在电力系统事故情况下，提供应急照明及通风使用。

配电总需求大约 5000kW，主要负载为通风及空调系统，还有照明系统。地下配电房还安装

有隔离变压器，为实验设备提供独立的电力。
地线系统包括实验设备地线和非实验设备（通用系统）安全地线系统。实验设备地线接入隔离变压器次级。两个地线系统不得有电气相通。安全地线系统设置在地面，地线随配电一起接入地下，供非实验设备接入；实验设备地线设置在地下实验厅本地。由于地面及地下地质构造以花岗岩为主，电阻率较高，为满足接地要求，拟采用高效电解离子接地极等措施构成地线系统。

通风及空调系统。 实验大厅内的温度应维持在 22℃左右，湿度小于 60%，要求满足同时有 50 名实验人员工作的通风要求。实验厅不要求有太高的洁净度，只要满足人员安全需求。液闪相关附属厅的洁净度可以参照大亚湾实验五号厅的标准，即 10 万级要求。在实际运行时可以采用一些方式（如高效过滤器）把洁净度提高到万级水平。
设置在斜井外冷水机组和新风系统将新风除湿、降温处理，经保温风管送到各实验厅，各实验厅空气经排放管汇总到竖井主排风管，经竖井处主排风机排出地下。
考虑到降低空气中氡气要求，已经满足人员在地下工作舒适性，实验大厅换气次数按 6 个体积/天设计。

给排水。 地下供水用于消防用水及实验用水。给水都取自消防给水干管，与消防给水系统采用合流制供水方式。
地下排水包括：岩壁渗水、冲洗排水以及消防排水。常规运行主要为岩壁渗水排水。根据渗水分布情况设置三个集水井及排水系统：一号集水井设置在斜井底部平段，用于排地下渗水排水；二号集水井设置在水池底部廊道，用于水池清洗排水；三号集水井设置在斜井-100 米处，洞口区域岩石差，渗水严重，该井拦截、排出该区域渗水。

消防系统。 消防系统包括：火灾自动报警与联动、消防供水及灭火器配置、事故排烟、应急照明及撤离。火灾自动报警系统达到对地下各类洞室及隧道、地面各类建筑物火灾探测报警的全覆盖。报警信号集中到地面消防控制中心，全天 24 小时专人监控。火灾相应区域报警信号实现联动，包括：切断电源和启动应急电源，关闭防火隔断门、关闭相应的排风阀，以隔断火源。启动排烟机。地下灭火主要靠消防水栓和灭火器，考虑到实验的特殊性，不采用喷淋灭火方式。事故排烟根据事故位置和人员撤离方向，或者竖井口排烟，人员从斜井撤离，或者斜井口排烟，人员从竖井撤离。事故发生后，自动切断动力电，启动应急电，用于事故排烟和照明，保证人员撤离。

通信系统。 实验站内地上、地下采用多种通信方式。首先是消防应急通信系统，直通地面消防值班室。工作通信采用一套具有广播功能、点对点呼叫、总机调度功能为一体的调度呼叫通信系统。对地下、地上全覆盖。在地上建筑物内及地下主要几个点安装有市话电话系统，实现对外联络。
通过当地网络运营商，实验站对外将购买高带宽、专用光纤通道。满足实验数据传送及办公需要。

10.4 风险分析及措施

基建工程风险的评估主要依赖于地质详细勘察结果（节 10.2），还实施专项风险评估，包括：地质灾害、地震、水土保持、周围环境影响风险评估。基建初步设计都将充分考虑地质勘查结果及专项评估建议。这里，只讨论施工阶段和运行阶段的主要风险，尤其是不可预测的风

险及措施。
本工程地下洞室埋深较大、跨度大，斜井地质条件复杂，不可预测的洞室或隧道坍塌及跑水是施工阶段的主要风险，这会直接影响工程进度及工程造价。地勘结果表明：斜井、竖井与实验厅连接平段隧道都有可能存在断层，这是影响施工进度和安全最大不确定因素。应对措施主要随着工程进行，做好地质超前预报，充分做好相应地质条件的工程准备。施工阶段另外一个主要风险就是岩爆。尽管目前地质勘查结果预测实验厅岩爆强度不大，但是，工程计划上充分考虑及降低岩爆的影响。
洞室及隧道坍塌以及地下水跑水也是运行期间主要的不可预测的风险。应对措施首先建立实时监测系统。建议设置一套三维可视化预警系统，实时监测洞室围岩的应力和变形情况，自动预警，即使采取应对措施。也可建立专门的安全监测顾问，通过分析终端数据库中的资料判断围岩稳定安全状况，起到及时发现隐患和安全预警的作用。两个出口的设计也为人员撤离提供了保障。
地下水状况也将通过监测每天排水量的情况，由此，结合地下洞室和隧道巡视情况，判断地下水异常。

10.5 进度及造价

基建工程总工期为 36 个月。预计 2014 年 11 月开工，2017 年 10 月交付使用。

正文

1) Design goal and specifications
2) Design (& options)
3) R&D results and planning
4) Manufacture & assembly
5) Risk analysis, safety, etc
6) Schedule & Cost

第11章　探测器组装和安装

11.1 主要指标

江门中微子实验区的土建工程以及各个子系统的研制、测试，在实验区完成装配、安装以后，通过系统集成整合、联调和试运行，使各个系统形成为一个有机的整体，保证中微子实验在将来的 15-20 年的有效运行。

11.1.1 总体目标

在江门中微子实验的全过程中，建立并规范各种规章制度，全面协调土建工程以及各个子系统的研制、测试进度，尤其是在实验区的装配和安装过程中，协调各系统的安装进度，为各系统的组装、安装创造条件。

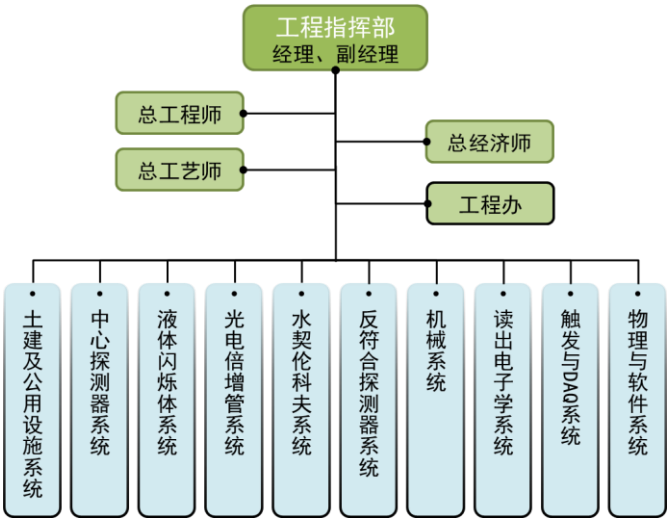
11.1.2 任务组成 3

具体任务主要包括：编制年度计划及进度；建立工程化的技术评审制度；规范化执行技术管理制度；严格执行工作现场的工作管理制度；制定并规范现场安全管理制度；配合各系统准备各种工装设备，为保障工程进度做好各种准备工作；根据现场情况，全面协调各系统的进场时间和安装进度，避免窝工；

11.1.3 研究内容 3

在地下 700 米处的大型洞室内，建立符合中微子实验站设计要求的各项装备及实验条件，完成中微子探测器、反符合探测器及各个子系统在地下洞室内（特别是水池内）的安装调试，包括：

- 各子探测器的设计研制汇总、评审；



- 组织在实验区的安装准备；
- 协调国内外各研制单位的技术接口；
- 协调地面、地下装配大厅的组装以及地下隧道（运输通道）与实验大厅的安装；
- 具体任务有：

1) 中心探测器的结构为直径为 37 米的超大型薄壳结构性容器，内装探测物质（液体闪烁体）20000 多吨及元件，置于纯净水的水池中，水池内壁及底部和顶部由反符合系统全面覆盖；

2) 中微子探测器与通常的科研装备的区别，这是一种特殊的大型建筑，但是其安装特点比一般的建筑要复杂得多，必须符合物理实验的特殊要求；

3) 在空间狭小的受限环境内完成全部系统集成，一些常规的安装设施及工具无法使用；

4) 实验室要面对水文地质条件复杂的环境，要解决全部探测器材料、元件、组件、电缆和配套装置的运输、装卸、存储、安装和调试的问题；

11.2 研究方案 2

11.2.1 建立并规范各种规章制度 3

11.2.1.1 建立工程化的技术评审制度 4

根据大亚湾反应堆中微子实验的经验，我们建立了一整套行之有效的经过实践检验的技术评审制度，在江门中微子实验工程中，我们可以借鉴这些有益的经

验，从各个系统的设计开始，进行方案论证，技术把关，严格认真地进行规范化的评审，包括，

- 初步设计评审（Preliminary Design Review，即 PDR）、
- 最终设计评审（Final Design Review, 即 FDR）、
- 重要的鉴定性设计评审（Critical Design Review, 即 CDR），
- 根据需要，还要在厂家（研制施工单位）进行
- 生产准备评审（Production Readiness Review, 即 PRR）、
- 关键性试验评审（Critical Test Review, 即 CTR）；
- 运行操作准备评审（Operation Readiness Review, 即 ORR）

11.2.1.2 规范化地执行技术管理制度 4

我们在大亚湾反应堆中微子实验的系列技术管理制度，可以作为借鉴，包括：

- 工程图纸系统（Engineering Drawing Control System）
- 工程改变管理程序（Engineering Change Control Procedure）
- 大亚湾工程的起重吊装实施规则（Daya Bay Hoisting and Rigging Practices）
- 安装及测试纲要（Draft Installation and Test Plan Outline）
- 机械设计标准、大纲以及评审（Mechanical Design Standards, Guidelines and Reviews）

11.2.1.3 严格执行工作现场的工作管理制度 4

◆ 我们在大亚湾的工程现场管理制度，可以借鉴并参照执行，包括，

- 大亚湾工程管理程序（Daya Bay Project Work Control Process）
- 大亚湾反应堆中微子实验工程设备鉴定及验收程序

◆ 在江门中微子实验工程现场，设立现场管理机构，由现场轮值值班经理（Local Installation Manager，简称 LIM）负责，所有在江门中微子工程现场的非办公室工作，都要事先提交文件化的工作程序填写工作管理表格（Work Control Form），其中关键性的工作（Critical items）必须经过总工程师批准，并且都要提交工作联系单（Task Control Form），只有在现场经理和安全员批准后，才被允许工作。

◆ 根据工程系统集成的需要，随时组织工程技术协调会，重点解决各系统间的技术接口。

11.2.1.4 制定并规范现场安全管理制度 4

- 配备专职安全经理，在发现有安全隐患的情况下，安全经理有随时叫停的权利。
- 实验厅和各装配打听配备专职安全员，安全员负责检查现场的各种安全隐患，发现隐患要及时报告安全经理，对不遵守安全规定的人员，有权阻止其进入工作现场。
- 安全培训（Safety Training Requirement）所有要安装现场的工作的人员，必须经过安全培训，经过培训合格后，发给工作区出入证，才允许进入工作区，进入工作区必须佩戴出入证。
- 重要危险区动火须申请动火证，经安全经理批准并发给动火证之后才能动火。

11.2.2 现场施工准备 3

11.2.2.1 环境准备 4

土建及通用运行系统的验收，包括：

1. 洞口及地面建筑要求：地面应化分为三个主要功能区：生活区，装配区，液闪区。生活区靠近园区入口，设置永久房间 15 间（带卫生间），设置厨房（食堂），设备安装期设置 50 间、后期拆除，共 65 间。实验控制楼可设在生活区和装配区之间，包括 3 间控制室，8 间办公室，2 间会议室；装配区设在斜井入口处，2 个临时装配实验大厅每个 2000 平米，其中一个设置吊车，便于设备运输，一个与大亚湾 SAB 要求基本一致， 500 平米永久实验厅展厅（前期可作为装配或存储）；液闪区最好在远离生活区的地方，可设置在入口处的山谷区域，这个区域包括液闪储运罐和纯化，及氮气存储（80 平米），氮气存储可设在液闪区和斜井洞口之间。
2. 斜井：如果可能，把斜井与平硐的交汇处处理成坡度较小的过度带，同时把 12 米长的斜井运输车厢分割为两个 6 米的车厢，这样可以使设备从斜井直接运送到基本水平的地带，或采用升降平台的方式，缆车分为两部分，即牵引车和货车，缆绳只与牵引车相连，牵引车与货车通过可拆卸挂钩相连，缆车运载货物运行时，升降台升起，其平台的上平面与斜井平面一致，到达与平硐交汇处，牵引车与货车脱钩，货车停在升降台上，升降台落下，其平台表面与平硐一致，可以方便用平硐内的天车吊装。斜井中部考虑建立缓冲区，用于引水至高纯水室、从地面引烷基苯至液闪存储间的减压需要。
3. 运输：实验设备最大件重量 20 吨，尺寸长度 12m，宽度 4m，高度 3m。斜井运输考虑三个设备：20 吨设备（长度 12m、宽度 4m、高度 3m）、5 吨设备

（长度 4m、宽度 4m、高度 3m）、运人车辆。竖井设置两节电梯做安装和运行期人员上下。

4. 绕池隧道：施工完成后该隧道要保留，可以作为安装和检修期间通道，而且，还可以作为小部件的运输通道。10%的坡度完全可以行使电瓶车。

5. 消防：设置消防给水系统及手提式灭火器。定点设置火灾报警器。在实验控制室内设置火灾报警和消防应急广播主机。按照国家有关标准，应设置监测可燃气体异丁烷的探测装置，要考虑监测装置的安置，具体监测系统由建设方提供。按照国家有关条例，设置探测器液闪泄露的探测装置，考虑相应的防护应急措施，设计时要考虑监测装置的安置，具体探测装置由建设方考虑 。设置专用的通风井；通过加隔断墙形成的消防分区，能够对火灾进行控制；排烟管道应该如何设置问题，能否获得专家的认可，需要进一步分析与咨询相关专家；从安全方面考虑，要留有足够的安全储备。考虑到工程的特殊性，消防安全方面的特殊设计应该考虑是否符合国家的相关规定，能否通过消防评审。

6. 供排水：1）对供水系统需要考虑分级供水时水管中的除锈和除菌问题，因此使用不锈钢管；2）将水净化系统设置在地面，将循环系统放在地下，这样可以减少地下的排水，同时在硐室里面预留 5%~10%的净化能力；3）将消防用水与生产用水分开来；4）除了正常的排水考虑外，还要考虑设备清洗期间大量废水的排放能力；5）考虑分段排水，不要等地面的水流到实验厅内再往上抽。

7. 水池桥面：该桥主要用于安装径迹反符合探测器、承载电子学系统和刻度平台。初步考虑桥面宽度 16 米，载荷约 150 吨，可以分成两部分，安装中心探测器的时候可以分开，便于吊装中心探测器部件，安装完成后，再合起来，方便电子学等实验设备的运输与安装。

8. 实验厅：实验厅拱顶跨度初步定为 48m，水池直径为 42.5m，操作平台长度暂定 10m。实验要求的水池内水温约 20 度。要求水池设计保温功能

9. 辅助洞室：原则是安装、液闪、其它（水系统，气体间，电子学间等）三个功能区各自相对独立，互不干涉，增加安全系数。安装区要尽可能设在斜井下来的平洞和实验厅之间，安装间跨度为 15m，长度为 50m；液闪区包括液闪处理间 500 m^2，液闪储存间 500m^2（设容量 200t 的集夜池，与液闪处理间共用），液闪灌装间 200 m^2；其它还有电子学间 12m×6m；气体间 80 m^2，水净化室 300 m^2，干式厕所 1 个，避难室 2 个，消防控制室。

10. 清洁：实验厅：不能要求有太高的洁净度，原则上只要能满足人员在里面能安全活动即可（安装的最后阶段，是否有更高要求）；液闪厅：洁净度可以参照大亚湾实验五号厅的标准，达到 10 万级即可。在实际运行时可以采用一些方式（如高效过滤器）把洁净度提高到万级水平。

11. 通风空调：实验大厅内的温度应维持在 22℃左右，湿度小于 60%，要求满足同时有 50 名实验人员工作的通风要求。

12. 地线：设备接地要求同一期，总接地电阻小于 1 欧姆。中微子实验的探测器均为电子设备，接地设计应注意把照明、动力和电子设备用电分别接

地，还应充分考虑岩石基地与土壤基地的不同。水池中的钢筋混凝土结构中的钢筋网是一个巨大的电容器，可以有效吸收各种干扰脉冲，因此可以作为电子学的悬浮地。

13. 电：鉴于本工程的重要性，应设置两路外来电源，并同时设置柴油发电机作为事故备用电源。在斜井入口、竖井入口及地下实验厅分别设置动力中心。为满足实验等生产要求，应设置接地、正常照明及应急照明等设施。运行和安装期间的用电量不大于 1000kW，土建施工期间的用电量不大于 5000kW，这不包括液闪蒸馏纯化所需要的电量。

14. 控制系统：设置综合自动化控制系统，用于整个工程的供电、排水、通风等控制，以及可燃气体、液闪、直流电源等的监视，并设置对外电话、对内调度通信及计算机网络系统。

11.2.2.2 设备及工装准备 4

用于安装的工程设备及工具的就位及验收，包括：

1. 起重机（桥式天车、悬臂式起重机、电葫芦）；桥机：实验大厅内设置的两台 20t/5t 桥机，要求能够到达水池内任意一点，安装间部分根据实验设备需要设置一台起吊设备，液闪厅设备吊装需要多大的吊装设备。
2. 叉车、手动液压车、地牛、小推车等；
3. 皮卡工具车、电瓶车等；
4. 高空作业平台：剪式升降台、曲臂式升降台、脚手架及浮动平台等；
5. 地面及地上装配大厅内的工装、夹具、胎具、工作台等；
6. 地面金工间、动力设备用房、控制室可投入使用；
7. 安全设施及用具落实到位；

11.2.2.3 实验厅准备 4

- 地下装配大厅内的检查，包括：
  - 安装前对模块的质检；
  - 模块的安装接口（标号、对接定位、电缆接口等）；
  - 模块的吊装准备；
- 完成地下实验大厅水池内的准直测量，包括，
  - 确定中微子探测器的安装基准（符合与反应堆的空间准直要求）；
  - 对水契伦科夫探测器在池内的安装划分若干作业面及基准；

- 确定安装的各个关键位置点，做标记，安装定位块及接口；
- 地下实验大厅内的各种吊装、安装、定位工装夹具全部到位；

11.2.3 探测器组装及安装 3

11.2.3.1 探测器组装 4

探测器的组装包括两个部分：反符合探测器的模块组装和中心探测器的模块组装。

反符合探测器的模块主要是顶部径迹探测器，无论是采用塑料闪烁体、液体闪烁体，还是阻性板探测器，都必须在地面组装成模块，经测试合格后，才能运到地下铺装，以加快地下现场的安装进度。

中心探测器的组装主要是要完成光电倍增管的清洁、防殉爆装置的安装，还要把光电倍增管组成一个个单元，这样才能提高现场的安装进度，同时在组装过程中还要完成对光电倍增管的简单测试，以防止安装后出现问题。因中心探测器需要比较高的洁净度，而且光电倍增管数量巨大，所以有可能需要一部分在地面装配大厅完成，另外一部分在地下装配大厅完成，是否需要都在情节间完成，还要根据探测器的整体方案和安装方案来确定。

11.2.3.2 反符合探测器安装 4

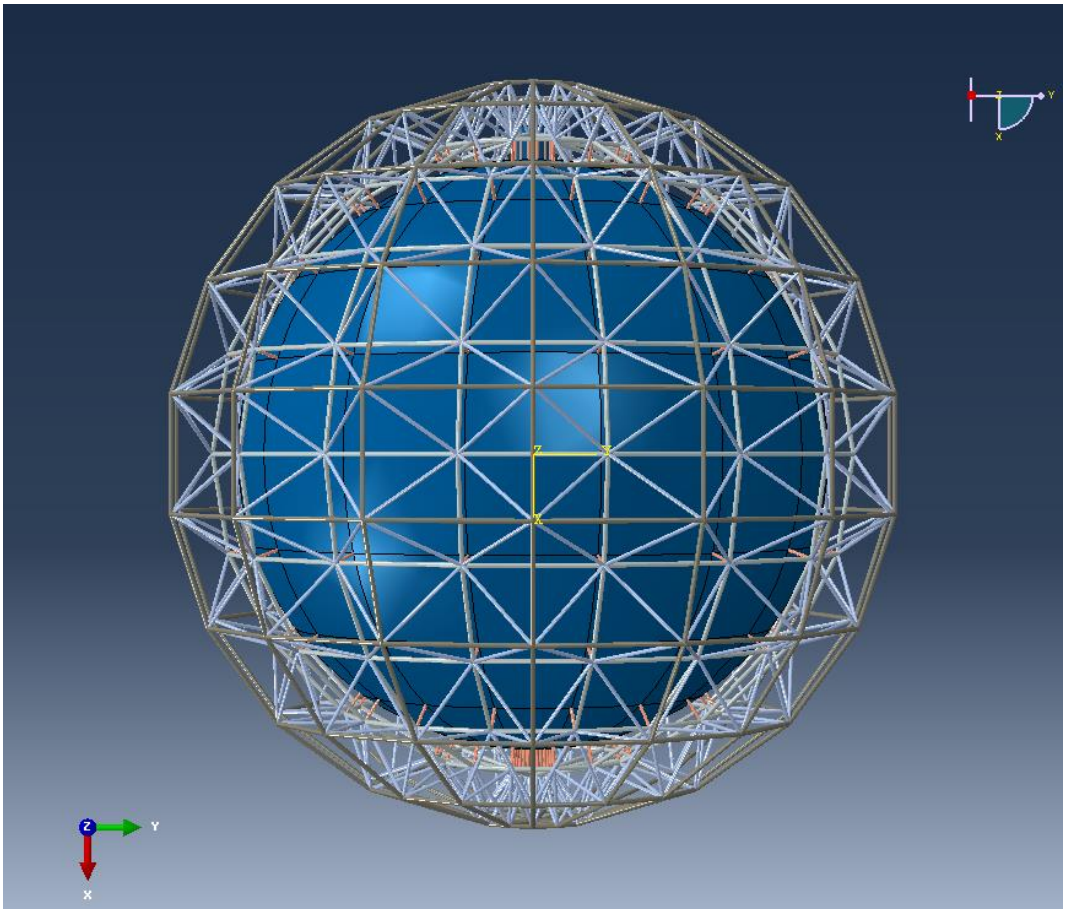
反符合探测器包括两部分：水契仑柯夫探测器和顶部径迹探测器。

水契仑柯夫探测器又包括水池内衬、地磁场屏蔽线圈以及光电倍增管的安装。水池内衬、地磁场屏蔽线圈要根据具体设计方案，并结合土建水池的工作合理安排进度和方式。而 PMT 的安装则要根据中心探测器的设计和安装方案来穿插进行，从而达到节省工期的目的。在中心探测器和水契仑柯夫探测器全部安装完成之后，封闭水池顶盖。

顶部径迹探测器的安装主要分为支撑结构的安装和探测器的安装。支撑结构的安装要在中心探测器总体结构完成后，光电倍增管还未安装之前安装，这样可以保证光电倍增管的电缆可以有存放的地方。而探测器模块的安装则要等中心探测器安装完成之后，而且水池盖子封上之后再安装，这样可以避免污染水池和中心探测器。

11.2.3.3 中心探测器安装（将根据探测器的最终方案的确定，再调整并优化具体实施方案）4

- 网架、有机玻璃球方案：
  - 总体结构安装：该方案首先要完成网架的制作，在网架完成 70%以后，这是顶部还有足够的空间来吊装有机玻璃板，开始有机玻璃球的制作，有机玻璃球从下面往上制作，到达顶部之后网架和有机玻璃球要一起制作。
  - 清洗：在完成总体结构安装之后，要对整个结构进行清洗，尤其是有机玻璃球内部的清洗，为了保证有机玻璃球内部的清洁，不会再光电倍增管安装期间受到污染，在有机玻璃球内部清洗完成后，要对可渡口等部位密封，防止灰尘进入。
  - 光电倍增管的安装：在完成清洗之后，开始光电倍增管的安装。
  - 再清洗：完成光电倍增管安装之后，要再次对总体结构进行清洗，这次主要是有机玻璃球外表面和光电倍增管表面（或者是防爆有机玻璃罩外表面）清洗。
  - 罐装：在检查确认保持清洁的情况下，可以开始罐装操作。
  - 具体方案还需要探测器组来制定



■ 不锈钢球罐、液袋方案：

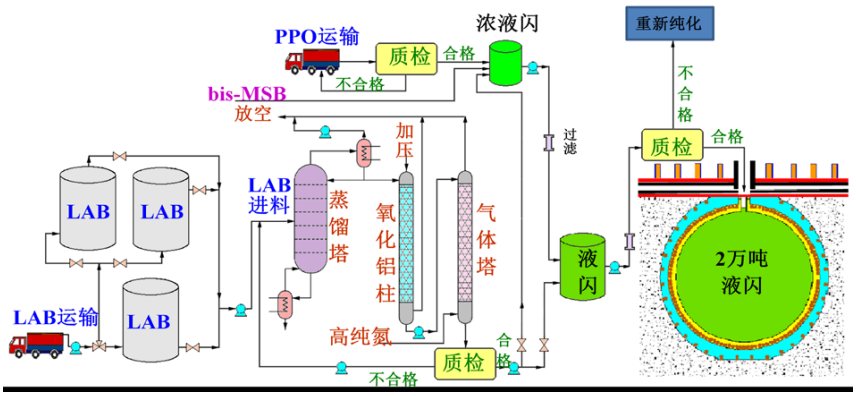
- 不锈钢球罐的制作：首先完成立柱和赤道一圈的定位，然后以这个为基准往上、下按维度吊装不锈钢板，并测量、定位、固定，预装配好并经过测量确认没有问题后，可以开始焊接，在焊接过程中要保持良好的通风。焊接完成后，要对焊缝检测，确认没有问题后开始酸洗、钝化、清洗。
- 光电倍增管的安装：首先利用不锈钢球内部的脚手架，在不锈钢球内表面铺设光电倍增管电缆（可能包含前端电子学），然后安装光电倍增管，并连接光电倍增管电缆，在安装光电倍增管的过程中，可以对光电倍增管做初步检测。
- 清洗：光电倍增管安装完成之后要进行清洗，确保不锈钢球罐内部和光电倍增管表面的清洁。
- 液袋安装：将液袋从上面的不锈钢球罐开口处吊入，并在下面和下法兰连接。在液袋内充气检漏，确认没有问题后可以开始液闪的罐装。

11.2.3.4 液闪罐装（将根据探测器的最终方案的确定，再调整并优化具体实施方案）4

液闪罐装主要分为两个环节：其一是提纯，其二是罐装。

液闪是整个实验的核心部分，要保证其质量，其关键在于原料的纯度，所以液闪的提纯是一个重要环节，就目前所知，其提纯方法主要是过滤和蒸馏，无论那种办法，都必须在现场完成，所以，保证液闪现场提纯是整体工艺的一个重要工作。但是现在液闪提纯方案还没有确定，所以还无法确定需要保证的内容。

液闪罐装是中心探测器硬件安装的最后一步，主要是保证罐装过程中不能有污染液闪的环节；探测器内外的液面高度不能差太多，具体标准还在制定当中，但是控制水池纯水的速度和液闪的速度是关键，因为中间液闪部分是一个球体，在不同阶段其液面的上升速度是不同的，相应的水面的上升速度也不同。如果都是固定流量，那么液闪液面上升最快的时候，正好是水面上升最慢的时候，而液闪液面上升最慢的时候，正好是水面上升最快的时候，所以流量控制是罐装过程中的重中之重。



11.2.3.5 电子学和数据获取系统安装（将根据探测器的最终方案的确定，再调整并优化具体实施方案）4

电子学和数据获取系统安装主要包括电缆的铺装、连接、电缆捡漏、性能测试等。如果是把电子学都放在水上，那么电缆量将非常巨大，电缆的铺装、捡漏工作量很大，需要及早考虑这方面的工艺及设备。如果气短电子学放在水下，那么如何保证前端电子学的可靠性，前段电子学盒的密封、检漏、电缆连接等将是非常重要的，协调好电子学和数据获取系统安装和探测器的安装、液闪的罐装，才能保证整个工程的进度。

11.2.3.6 刻度系统安装（将根据探测器的最终方案的确定，再调整并优化具体实施方案）4

刻度系同时对探测器各个光电倍增管增益、效率的标定，是探测器能量分辨的保证，也是整个实验能否成功的关键环节。原则上他应该安装在探测器的顶部，能够实现对探测器的日常标定。他需要在中心探测器安装完成之后再安装。

11.2.3.7 系统调试（将根据探测器的最终方案的确定，再调整并优化具体实施方案）4

在各个子系统全部安装就绪后，进行系统联调，这部分工作主要有电子学和数据获取组完成，内容主要包括各道电子学的时间关系、与触发系统的时间关系、软件系统的调试等。具体方案也许要等电子学方案确定之后才能确定。

11.3 工期计划 2