

大亚湾反应堆中微子实验

触发系统的设计研究

(申请清华大学工学博士学位论文)

培养单位：工程物理系
学 科：核科学与技术
研 究 生：王 璞
指 导 教 师：邵 贝 贝 教 授

二〇一一年十月

大亚湾反应堆中微子实验触发系统的设计研究

王

玺

A Design Study of the Trigger System for Daya Bay Reactor Neutrino Experiment

Dissertation Submitted to
Tsinghua University
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in
Nuclear Science and Technology
by
Wang Xi

Dissertation Supervisor: Professor Shao Beibei

October, 2011

摘要

大亚湾反应堆中微子实验的目标，是通过探测大亚湾核电站反应堆群产生的反电子中微子，在90%的置信度下，使得实验测量中微子振荡参数 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的灵敏度达到0.01或更好。为此，对实验的各个部分有很高的要求。按照设计，由触发系统引起的误差不能超过0.01%。因此，需要设计出一个稳定的、高效的、而且在逻辑上是冗余的触发系统。本论文的主要工作是对大亚湾反应堆中微子实验的触发系统进行设计研究。

大亚湾反应堆中微子实验的中微子探测器与水契伦科夫宇宙线 μ 子探测器采用了局部触发模块的设计。本论文基于已有的局部触发电学，为了提高触发效率和分析探测器性能，分别为Nhit（击中数）和Esum（能量和）这两种互相补充的触发逻辑添加了三阈值触发模式，进一步完善了局部触发逻辑。并且，为了现场调试的实际需求，还增加了时钟报错逻辑、以PPS（每秒一个脉冲）为标记的预分频逻辑以及死时间检测功能。

为了对实验中的中微子探测器、水契伦科夫和阻性板室（RPC）宇宙线 μ 子探测器进行相互关联等研究，本文设计主触发模块电子学，并且根据中微子的探测反应过程，设计了或逻辑交互触发、反符合交互触发、回看交互触发以及刻度触发模式，这些与物理含义密切相关，不仅通过事例标记为离线数据分析提供便利，而且对在线数据筛选方面起了重要作用。另外根据实验的需求，还设计了八通道独立输出逻辑、预分频逻辑和编码串行化传输逻辑。

最后，论文设计并搭建了独立的触发系统测试平台。利用该平台的模拟数据、大亚湾现场实验所采集的刻度数据，以及中微子反应和本底数据，对触发系统的硬件与固件进行了触发效率研究，结果表明目前的触发系统达到了设计要求。

关键词：大亚湾反应堆；中微子实验；触发系统；触发逻辑；触发效率；

Abstract

The Daya Bay neutrino experiment is a neutrino-oscillation experiment designed to measure the unknown neutrino mixing angle $\sin^2 2\theta_{13}$ with a precision of 0.01 or better at 90% confidence level using antineutrinos produced by the reactors of the Daya Bay nuclear power station. To realize the physical goal, the trigger system of Daya Bay Neutrino Experiment should have a systematic error less than 0.01%. So the trigger system must be stable and reliable. And the trigger logic must be redundant in the design. This thesis work focuses on the improvement of the local trigger logic, the design of the master trigger logic, and the study of the trigger efficiency of the trigger system.

In order to improve the trigger efficiency and analyze the performance of the detectors and electronics, three-threshold Nhit and Esum trigger logics are specially designed and added into the local trigger module. In addition, three other logics are also implemented in the local trigger module for debugging flexibility: clock error check logic, PPS (Pulse Per Second) based trigger prescale logic and dead time measurement logic.

Moreover, this thesis introduces the design of the master trigger module. According to the neutrino detection reaction, four special trigger logics are designed in the master trigger module: “or” logic for cross trigger, veto logic for cross trigger, look-back logic for cross trigger and calibration trigger logic. These trigger logics contribute to the offline data analysis and the online data selection. And, the master trigger module is designed to be able to generate 8 cross triggers independently, prescale the trigger signals and transmit the trigger information in serial code.

Finally, this thesis work designed and built a test system for the trigger system. The trigger efficiency has been calculated by using the simulated data generated by the test system, the calibration data of Daya Bay neutrino experiment, and the neutrino reaction and background data. The results prove the trigger system meets the design requirement. In Oct 2011, the detector and electronics in the near hall of Daya Bay neutrino experiment has detected the first neutrino event.

Key words: Daya bay reactor; neutrino experiment; trigger system; trigger logics; trigger efficiency

目 录

第 1 章 绪论	1
1. 1 课题背景	1
1. 2 中微子振荡基础理论	2
1. 2. 1 中微子振荡理论和振荡矩阵	2
1. 2. 2 反应堆测量振荡参数的方法	4
1. 3 大亚湾反应堆中微子实验简介	5
1. 3. 1 实验布局	5
1. 3. 2 探测器	7
1. 3. 3 电子学结构	10
1. 3. 4 触发系统	11
1. 4 论文工作内容和意义	11
1. 4. 1 论文各部分主要内容	12
1. 4. 2 课题研究的意义和创新点	12
第 2 章 大亚湾反应堆中微子实验触发系统的设计方案	14
2. 1 触发系统的设计难点	14
2. 2 触发系统的逻辑结构	14
2. 3 触发系统的特点	16
2. 4 小结	17
第 3 章 局部触发模块的逻辑方案	18
3. 1 局部触发逻辑的整体设计	18
3. 2 N_{hit} 和 E_{sum} 触发方式的比较	20
3. 3 N_{hit} 触发模式	21
3. 3. 1 普通 N_{hit} 触发	21
3. 3. 2 三阈值 N_{hit} 触发	22
3. 4 E_{sum} 触发模式	23
3. 4. 1 模拟域的 E_{sum} 触发	24
3. 4. 2 数字域的 E_{sum} 触发	25
3. 4. 3 数字域的三阈值 E_{sum} 触发	25
3. 5 其他触发源	26

3. 6 触发数据包.....	27
3. 7 标记丢失触发信号的逻辑.....	28
3. 8 预分频逻辑.....	28
3. 9 时钟报错机制.....	29
3. 10 小结.....	30
第 4 章 主触发模块的逻辑方案	31
4. 1 主触发逻辑的整体设计.....	31
4. 2 或逻辑触发.....	32
4. 3 反符合触发.....	33
4. 4 回看触发.....	34
4. 5 触发数据传送.....	36
4. 6 独立输出通道.....	36
4. 7 小结.....	37
第 5 章 触发系统的硬件实现	38
5. 1 硬件设计原则.....	38
5. 2 主触发模块硬件.....	38
5. 2. 1 FPGA 及其配置电路	38
5. 2. 2 VME 总线	40
5. 2. 3 时钟电路	42
5. 2. 4 数字信号输入输出电路	42
5. 2. 5 实物图	43
5. 3 局部触发模块硬件.....	44
5. 4 大亚湾反应堆中微子实验现场安装情况.....	45
5. 5 小结.....	45
第 6 章 触发测试系统	46
6. 1 触发测试系统的作用	46
6. 2 触发测试模块的逻辑	46
6. 3 触发测试软件	48
6. 4 触发测试硬件	48
6. 4. 1 特点	48
6. 4. 2 实物图	51
6. 5 局部触发模块的测试方案	52

6.6 小结.....	52
第7章 触发系统的性能分析.....	53
7.1 触发效率.....	53
7.1.1 单板触发效率.....	53
7.1.2 绝对触发效率.....	60
7.1.3 相对触发效率.....	62
7.1.4 与顶点相关的触发效率.....	64
7.2 触发死时间.....	66
7.2.1 局部触发模块的死时间.....	66
7.2.2 主触发模块的死时间.....	67
7.3 小结.....	67
第8章 总结与展望.....	68
8.1 主要成果与创新.....	68
8.2 后续工作展望.....	68
参考文献	70
致 谢	73
声 明	74
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果	75

主要符号对照表

AD	反电子中微子探测器 (Antineutrino Detector)
WP	水池探测器 (Water Pool detector)
WPI	内水池探测器 (Water Pool Inner detector)
WPO	外水池探测器 (Water Pool Outer detector)
RPC	阻性板室探测器 (Resistive Plate Chambers)
PMT	光电倍增管 (Photomultiplier Tube)
FEE	前端电子学 (Front-End Electronics)
LTB	局部触发板 (Local Trigger Board)
MTB	主触发板 (Master Trigger Board)
TTB	触发测试板 (Trigger Test Board)
DAQ	数据获取系统 (Data Acquisition System)
GPS	全球定位系统 (Global Positioning System)
Gd	钆 (Gadolinium)
LS	液体闪烁体 (Liquid Scintillator)

第1章 绪论

1.1 课题背景

中微子是构成物质的基本粒子，中微子物理是近代物理研究的热点之一。1998年日本超级神冈中微子实验首次在大气中微子中发现了中微子振荡现象^[1]，并且在之后的加拿大 SNO^{[2][3]}实验与日本 KamLAND^{[4][5]}实验中得到了证实。中微子振荡现象对粒子物理的标准模型提出了挑战，因为在粒子的标准模型中，中微子是没有质量的，而中微子产生振荡现象的前提就是中微子有质量。

用于描述中微子振荡现象的振荡矩阵中有六个参数，目前还没有精确测量的参数是混合相角 θ_{13} 、CP 破坏相角和质量平方差 Δm_{32}^2 的符号。其中，混合相角 θ_{13} 的大小决定了未来中微子物理的发展方向。如果 $\sin^2 2\theta_{13} > 0.01$ ，下一代长基线实验就可以测定 CP 破坏相角。如果 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.01$ ，将不能测得 CP 破坏相角。CP 破坏相角对于理解物质与反物质的不对称理论、粒子物理的大统一理论、以及未来中微子物理的发展方向都具有重要意义^[6]。

国际上有多个国家使用不同的实验方案对中微子进行研究，主要有法国的 Double CHOOZ^{[7][8]}、日本的 Super Kamiokande、韩国的 RENO^[9]，还有中国的大亚湾反应堆中微子实验 (Daya Bay reactor neutrino experiment)^[10]。目前对于 θ_{13} 的实验测量结果分别是：法国的 CHOOZ 反应堆中微子实验在 95% 的置信度下，测得 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.17$ ^{[11][12][13]}；日本的 T2K 加速器中微子实验在 90% 的置信度下，测得 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.28$ ^{[14][15]}；以及美国的 MINOS 加速器中微子实验在 90% 的置信度下，测得 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.22$ ^[16]。然而这些实验的精度都不足以证实 $\sin^2 2\theta_{13}$ 是否大于 0.01，所以需要更高精度的实验来精确测量这一重要参数。

大亚湾反应堆中微子实验是以中国和美国为主导的大型基础科学实验，目标是通过探测大亚湾核电站反应堆群产生的反电子中微子，在 90% 的置信度下，使得实验测量中微子振荡参数 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的灵敏度达到 0.01 或更好^[17]。

清华大学承担了该实验中的触发系统和时钟系统的研制工作。其中，触发系统是数据处理和在线筛选事例的重要部分，不仅是高速数字和模拟信号的复杂逻辑处理系统，而且触发方案也需要考虑中微子探测的物理背景。

本文就是在此背景下，结合探测中微子的物理方案，根据电子学的设计精度要求，为大亚湾反应堆中微子实验设计并完成触发系统，通过数据分析，证实触发系统达到设计预期。

1.2 中微子振荡基础理论

根据粒子的标准模型, 粒子分为三类: 一类是传递相互作用的玻色子; 二是不参与强相互作用的费米子, 叫轻子, 有电子、 μ 子、 τ 子和对应的中微子; 三是参与强相互作用的各种夸克。三代夸克之间有代的混合, 因为夸克有静止质量。粒子物理的基本模型如图 1.1 所示:

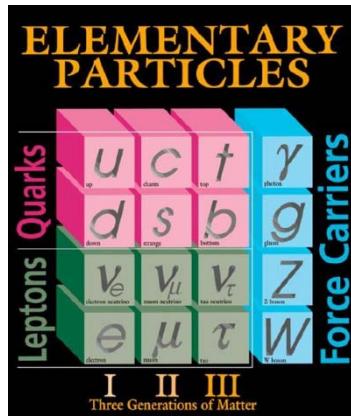


图1.1 基本粒子的标准模型

在标准模型中, 中微子被认为是没有质量的, 只参加弱相互作用的, 自旋是 $1/2$ 的电中性费米子, 遵循 Fermi-Dirac 统计^{[18][19]}。

1.2.1 中微子振荡理论和振荡矩阵

通常可以用两种等价的方式来描述中微子。一种描述方式与中微子的质量相关, 每种中微子对应一个确定的质量, 称为质量本征态。另一种描述方式与中微子的相互作用相关, 即电子中微子、 μ 子中微子和 τ 子中微子, 称为弱作用本征态, 有的书籍称为味道本征态。中微子的产生和探测都是通过弱相互作用, 而传播则由质量本征态决定^{[20][21]}。中微子传播和振荡现象可以由图 1.2 说明。

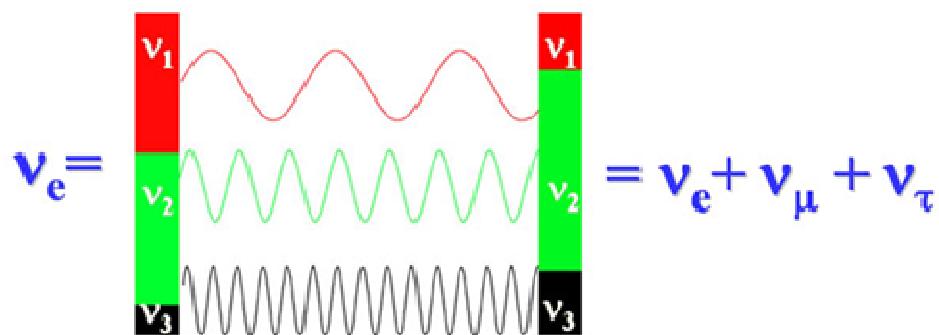


图1.2 中微子振荡原理示意图

图 1.2 中 ν_e 、 ν_μ 和 ν_τ 是中微子的弱作用本征态， ν_1 、 ν_2 和 ν_3 是中微子的质量本征态。中微子的质量本征态按照不同频率的物质波进行传播，在观测中微子的时候，只能用弱作用方式探测中微子的弱作用本征态。所以在不同的距离上观测中微子，就会呈现不同的弱作用本征态组成，这一现象被称为中微子振荡^[21]。

中微子振荡实验可分成两类，一类实验是测量中微子的存活几率，称为消失实验，如公式 1-1，它反映的是一种中微子存在的几率。另一类实验是新的弱作用本征态中微子出现的几率，称为产生实验，如公式 1-2^[22]。

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta_{ij} \sin^2 [1.27 \Delta m_{ij}^2 L / E] \quad (1-1)$$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta_{ij} \sin^2 [1.27 \Delta m_{ij}^2 L / E] \quad (1-2)$$

其中 $\alpha = 1, 2, 3$ ， $i = 1, 2, 3$ ， $j = 1, 2, 3$ ， $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ 单位为 eV^2 。 m_i 是质量本征态的中微子质量。 L 是距离，单位是千米。 E 是中微子束流能量，单位为 GeV 。

从公式 1-1 和 1-2 可以看出，中微子的存活几率和产生几率都与中微子束流到探测器的距离和中微子质量本征态的质量有关。这说明因为中微子存在振荡现象，所以推断出中微子的质量不为零，也就存在弱作用本征态的混合。

用混合角矩阵描述质量本征态和弱作用本征态的关系如公式 1-3 所示^[23]：

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1-3)$$

把上述参数按照中微子来源参数化，如公式 1-4 所示^{[23][24]}：

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{-i\delta} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1-4)$$

这个 U 矩阵称为 MNSP (Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo) 矩阵^[25]，其中右边的三个矩阵分别表示不同的中微子来源：大气中微子，反应堆和加速器中微子，太阳中微子。

从以上的中微子振荡公式和混合角矩阵可以得出，中微子振荡可以由六个参数表示：三个混合相角 (θ_{13} 、 θ_{23} 、 θ_{12})，两个独立的质量平方差 ($\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$ ， $\Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2$)，一个 CP 破坏相角 δ 。其中 $\Delta m_{31}^2 = m_3^2 - m_1^2 = \Delta m_{32}^2 + \Delta m_{21}^2$ 可以由 Δm_{32}^2 和 Δm_{21}^2 推出。利用不同的中微子源测量这些参数，能够完整的分析中微子振荡的特点。目前只有两个半参数没有得到精确测量：CP 破坏相角 δ 、 θ_{13} 和 Δm_{32}^2 的

符号^{[26][36]}。

从公式 1-4 中可以看出, CP 破坏相角和 θ_{13} 有耦合关系, 能否测量 CP 破坏相角, 如何测量 CP 破坏相角, 取决于 θ_{13} 的大小。如果 $0.01 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.03$, 下一代长基线实验就可以采用合适的实验方法来测定 CP 破坏相角, 进而解释宇宙中物质与反物质的不对称现象。如果 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.01$, 中微子的 CP 破坏相角将无法通过长基线实验来测量, 就无法用中微子的特性来解释物质与反物质本底不对称理论。如果 $\sin^2 2\theta_{13}$ 接近于零, 则预示着新的对称性的存在。所以, 无论精确测量得到的 θ_{13} , 还是证明它的数值极小, 对未来物理学的发展, 宇宙起源的认识。粒子物理的大统一理论, 及其未来中微子物理的发展方向等都有重要的意义。

1.2.2 反应堆测量振荡参数的方法

中微子与其他物质很难发生反应, 反应截面在 10^{-43} cm^2 左右, 所以必须寻找数目庞大的中微子源, 并且屏蔽掉天然本底和宇宙线, 采用特殊的探测手段, 才能探测到数量极少的中微子事例^[27]。

核电站的核反应堆在发电的时候, 会产生大量的中微子。每一次核燃料的铀和钚通过裂变反应, 释放 200 MeV 能量, 并且产生 6 个反电子中微子。以一个热功率为 3 GW 的核反应堆为例, 每秒能够释放 6×10^{20} 个反电子中微子, 其中 75% 的反电子中微子能量低于 1.8 MeV , 最高能量达到 8 MeV ^[10]。

探测反电子中微子的另一项重要工作就是屏蔽宇宙线, 地表的宇宙线平均每秒每平方米 200 个。所以采用山体岩石屏蔽的方法, 把探测反电子中微子探测器放置在反应堆附近的山洞里。

即便把探测器放置在山洞里, 宇宙线的数量还是会远远超过中微子事例。所以采用多种类型的探测器分别进行屏蔽和测量, 并且调整反电子中微子探测器的靶物质成分, 进一步提高反应截面, 从而探测到更多的反电子中微子事例。

通过反 β 衰变来探测反中微子能谱是目前比较有效而且通用的探测反电子中微子事例的方法。以一吨靶物质为液体闪烁体为例, 在距离每 GW 功率反应堆 100 米处, 每天能够探测到 100 个反电子中微子事例^[10]。

通过实验观察到的反中微子的能谱是反应堆反电子中微子的能谱与反 β 衰变反应截面共同作用的结果。图 1.3 显示了反应堆释放出的反电子中微子能谱, 反 β 衰变的反应截面和实际探测器探测到的反电子中微子能谱^[10]。

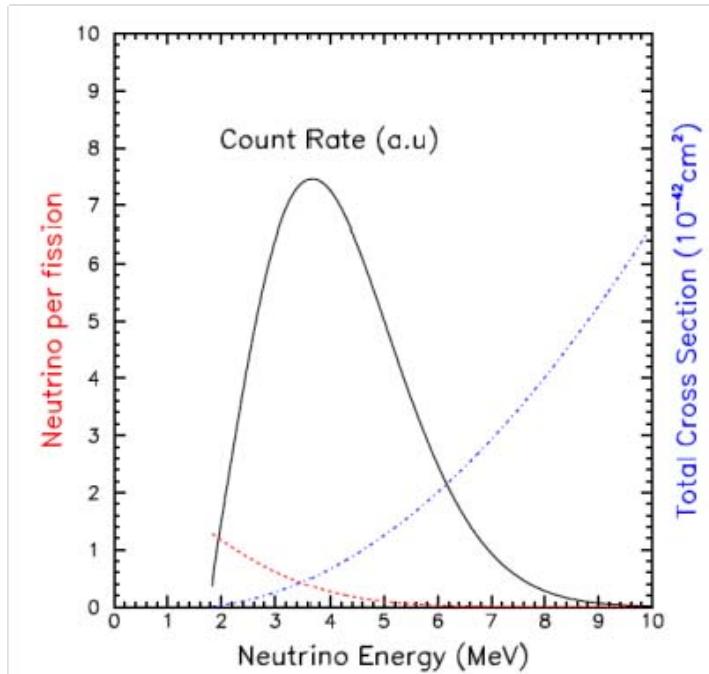


图1.3 反电子中微子能谱与反应截面和实际反应堆中微子能谱的关系

图1.3中红色的虚线表示反电子中微子的能谱。蓝色的点划线表示反 β 衰变的总反应截面。黑色的实线表示中微子探测器观测到的反电子中微子的能谱。探测反电子中微子能谱，就可以探测反电子中微子事例。

1.3 大亚湾反应堆中微子实验简介

大亚湾反应堆中微子实验是以中国和美国为主导的，俄罗斯、智利、捷克、香港地区和台湾地区等共同合作的反应堆中微子实验^[28]。

1.3.1 实验布局

大亚湾核电站位于中国广东省的大鹏镇。这里面朝大海，背靠群山，不仅为反应堆提供了必要的工作条件，也是大亚湾反应堆中微子实验的理想选址。大亚湾核电站有三个反应堆组：大亚湾反应堆组、岭澳一期反应堆组和岭澳二期反应堆组。每个反应堆组都由两个2.7GW的核反应堆构成。2011年8月，岭澳二期反应堆组全面投产，大亚湾核电站反应堆群的总能量达到17.4GW，是目前世界上第二大反应堆群^[10]。

高功率的大亚湾核电站为中微子实验提供了丰富的反电子中微子源，周围的岩石山体也为中微子实验屏蔽了天然本底，为实现大亚湾反应堆中微子实验的低本底高精度要求提供了得天独厚的条件。大亚湾反应堆中微子实验就建造在反应

堆附近的岩石山腹里，从2007年破土动工至今，实验已完成土建工程，进入探测器安装、电子学调试和初步物理取数阶段。



图1.4 大亚湾反应堆中微子实验布局图

图1.4显示了两个近点和远点与反应堆的相对位置，各个实验点之间由隧道相连。该实验的三个观测点分别是：距离大亚湾反应堆组360米处的一号近点、距离岭澳反应堆组480米处的二号近点、距离大亚湾反应堆组和岭澳二期反应堆组分别为1600米和1300米处的远点。

探测器放置的位置距离反应堆的直线距离称为基线。为了精确测量 θ_{13} ，需要选择合适的探测器放置位置和基线长度。图1.5显示了基线与振荡频率的关系^[31]。

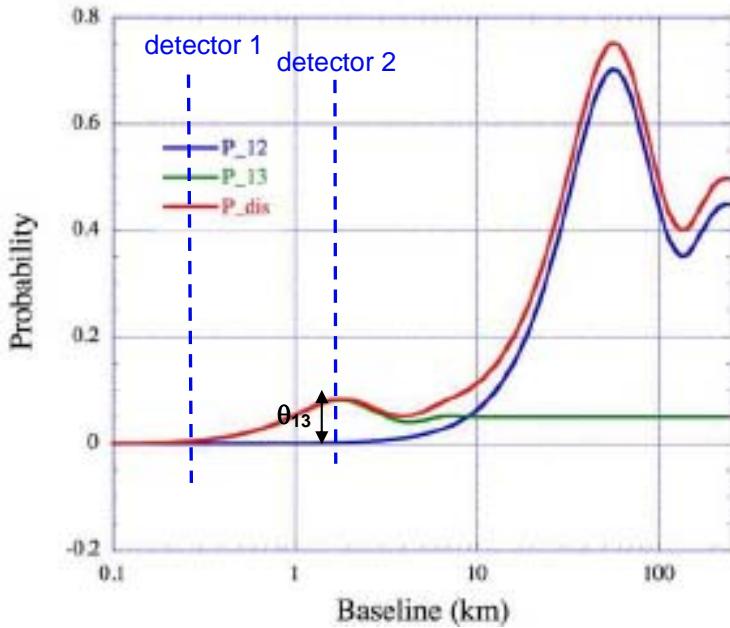


图1.5 反应堆反电子中微子的消失几率与基线的变化关系图

蓝色线是 P_{12} 随着基线长度的变化曲线，绿色是 P_{13} 随着基线长度的变化曲线， P_{12} 和 P_{13} 的分别表示中微子出现的几率，由公式 1-2 给出。红色曲线 P_{dis} 是反电子中微子的消失几率随着基线的变化曲线， P_{dis} 等于 P_{12} 与 P_{13} 相加。

从图 1.5 中可以看出，在距离反应堆 1600 米处，达到 θ_{13} 的极大值。大亚湾反应堆中微子实验的近点选在距离反应堆大约 300 米处， P_{12} 和 P_{13} 都没有起振，以便较好的监测未振荡的反应堆中微子能谱。远点选在距离反应堆大约 1800 米处，能够测量到振荡后的中微子能谱，而且在这个位置， P_{12} 还没有起振， P_{13} 已经达到极大值，这样测量的 θ_{13} 较为干净，不会受到 θ_{12} 较大的影响^{[10][27][29]}。

1.3.2 探测器

大亚湾反应堆中微子实验探测器由两大部分构成，一是探测反电子中微子的探测器（Antineutrino Detector，即 AD）。另一是探测宇宙线 μ 子的探测器，用于天然本底事例的反符合，包括两种探测器：阻性板室探测器（Resistive Plate Chambers，即 RPC）和水契伦科夫探测器^{[29][30]}。

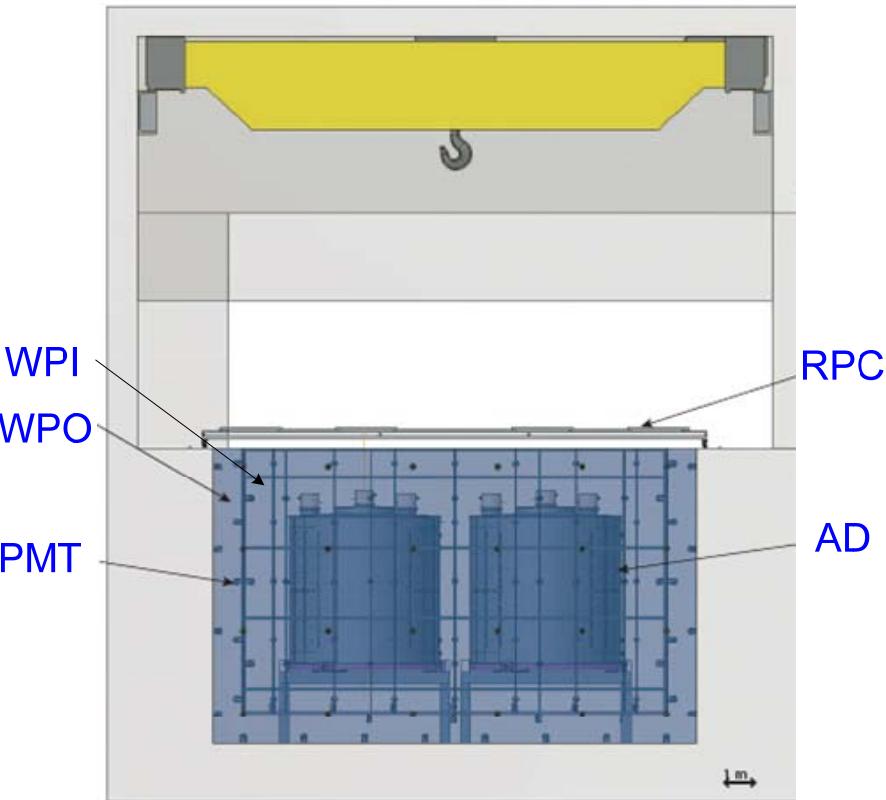


图1.6 探测器的侧视图

图1.6是在一个实验厅内的探测器侧视图。其中，反电子中微子探测器(AD)和水契伦科夫探测器通过光电倍增管(Photomultiplier Tube, 即PMT)将光子信号转化为电信号的。反电子中微子探测器的光电倍增管安装在钢罐的壁上。在水池边缘的架子上分别安装了向内的和向外的光电倍增管，将水契伦科夫探测器分为的内外两部分，分别称为内水池(Water Pool In, 即WPI)和外水池(Water Pool Out, 即WPO)，也可以统称为水池探测器(Water Pool, 即WP)^{[32][35]}。

在水契伦科夫探测器的顶部，放置了四层阻性板室探测器(RPC)，采用“四选三”的逻辑探测宇宙线 μ 子。而且阻性板室探测器在每个方向上比水池向外延伸了1米，能够遮盖水池边缘的缝隙。水契伦科夫探测器与阻性板室探测器相结合，提高了宇宙线 μ 子的探测效率。

大亚湾反应堆中微子实验的两个近点都分别安装了水契伦科夫探测器、阻性板室探测器和两个反电子中微子探测器。远点则安装了水契伦科夫探测器、阻性板室探测器和四个反电子中微子探测器。

反电子中微子探测器是整个探测器的关键部分，主要用于探测反电子中微子事例。图1.7显示了反电子中微子探测器的内部结构。

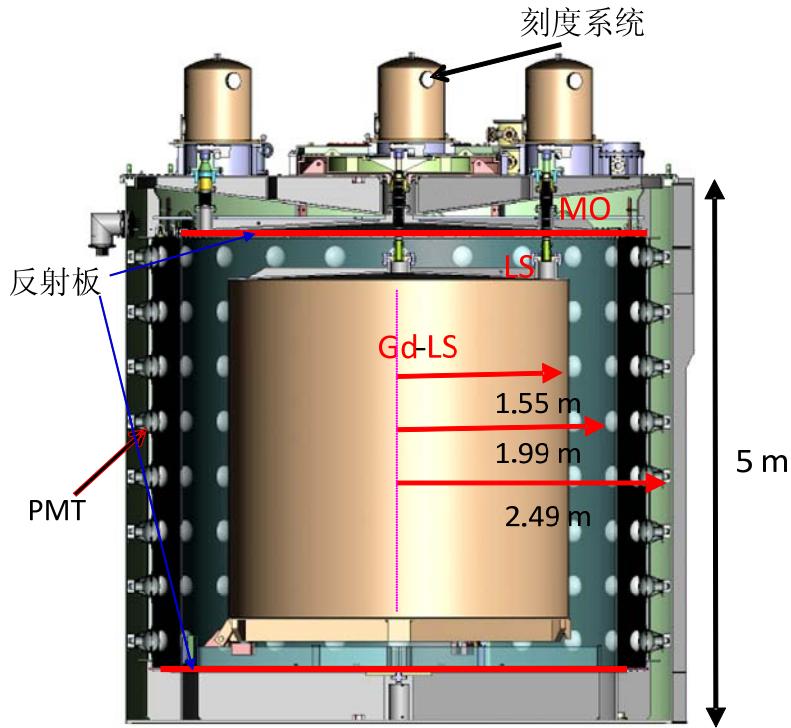
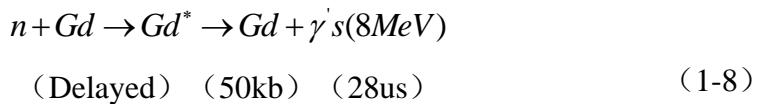
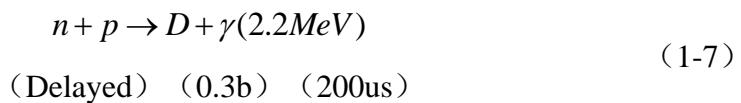
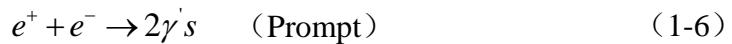


图1.7 反电子中微子探测器结构图

反电子中微子探测器由三个直径分别为3米,4米和5米的圆柱组成,从内向外装有掺钆的液体闪烁体(Gadolinium-Liquid Scintillator,即Gd-LS),普通液闪(Liquid Scintillator,即LS),矿物油(Mineral Oil,即MO)。最外层的罐壁上安装了光电倍增管,用于探测反电子中微子发生反应时产生的快信号电子和慢信号 γ 光子。在钢罐内部的顶端和底面安装了反射板,帮助光电倍增管吸收更多的光子信号^{[32][34]}。

大亚湾反应堆中微子实验利用反 β 衰变探测反应堆中微子。中微子信号的特点是快信号和慢信号存在时间和能量上的关联,其中快信号是正电子湮没,慢信号是中子被俘获。反应式如下^{[10][29][30]}:



根据快信号和慢信号之间的时间和能量的符合关系，判断出反电子中微子。其中正电子湮灭产生的能量范围从 1MeV 至 8MeV。在延迟信号中，中子被质子俘获 (n-p)，放出的光子能量是 2.2MeV，反应截面 0.3b，延迟时间大约是 $200\ \mu s$ 。中子被钆俘获 (n-Gd)，放出光子能量是 8MeV，反应截面 50kb，延迟时间大约 $28\ \mu s$ 。

中子被钆俘获的反应截面大，延迟时间短，放出光子能量高，所以探测器的靶物质采用掺钆的液体闪烁体以提高中子的俘获几率^[33]。

1.3.3 电子学结构

大亚湾反应堆中微子实验的电子学主要包括前端电子学，触发系统，时钟系统，数据获取系统。探测器的电子学部分主要目标是：高效触发、快速响应、死时间少、低阈值、准确记录探测器获得的电信号。

电子学各个部分的功能如下：

前端电子学 (Front-End Electronics, 即 FEE) 处理来自光电倍增管的信号，记录信号的时间和电荷信息，并统计光电倍增管被击中个数和沉积在光电倍增管中的能量和，把这两种信息传递给局部触发模块。一个前端电子学最多可以处理 16 个光电倍增管的信号^{[37][39]}。

触发系统包括局部触发模块 (Local Trigger Board, 即 LTB) 和主触发模块 (Master Trigger Board, 即 MTB)。触发系统根据前端电子学的两类信号，按照多种触发方式产生触发信号。一个局部触发模块可以最多处理 16 个前端电子学的信号。

数据获取系统 (Data Acquisition System, 即 DAQ) 根据触发信号把局部触发模块和前端电子学内部的数据通过 VME (Versa Module Euro card) 总线存储下来。数据包括触发类型、触发时间、信号特征、以及前端电子学记录的每个光电倍增管俘获光子信号时的时间和电荷信息^[38]。

时钟系统通过卫星，使用 Global Position System (GPS) 装置获得世界标准时间，并且使用铷时钟获得稳定的、精确的工作时钟。时钟系统把工作时钟和标准时间信息传给每个实验厅的局部触发模块，由局部触发模块把时钟广播给所有的前端电子学，保证同一个子探测器的所有电子学使用同步的时钟和时间信息进行数据处理工作^[40]。

所有的反电子中微子探测器和水契伦科夫探测器都使用同样的电子学读出系统，整个实验的电子学需要 14 个局部触发模块，3 个主触发模块。加上备份，实验一共需要 19 个局部触发模块和 4 个主触发模块。

在整个电子学的设计中，所有数字和模拟的信号都采用差分信号传输方式，以减少外界干扰。数字信号采用 80MHz SDR (Synchronous Data rate) 传输模式，以保证高效稳定的数据传送。

1.3.4 触发系统

在高能物理实验中，前端电子学需要快速采集处理信号，如果不加筛选，数据量将会非常庞大，数据获取系统不可能在很短的时间内把所有数据传输并且记录下来，造成数据拥堵，进而丢失数据。另一方面，在物理分析时，过多的本底数据也是没有必要的，而且会增加数据分析处理的时间和难度。所以在高能物理实验中，触发系统是在线筛选事例的关键一环^{[41][42]}。

触发系统不仅要快速获取来自前端电子学的数据，还要根据实际的物理含义，减轻数据获取系统的传输压力，对数据做合适的触发判选，然后将处理后的数据传送给数据获取系统。

大亚湾反应堆中微子实验的触发系统主要工作包括：

- (1) 快速获取前端电子学的数据。
- (2) 考虑中微子探测的物理过程，采用合适的触发逻辑产生触发信号。
- (3) 记录并且打包触发信号的时间和类型等多种信息，通过数据获取系统将触发信号传送至离线数据库。
- (4) 为时钟系统广播工作时钟，保证整个电子学系统同步工作。

为了提高大亚湾反应堆中微子实验测量精度，触发系统在设计实现方面需要注意以下方面：

- (1) 触发效率高，减少漏触发和误触发。
- (2) 触发阈值的动态范围适用。
- (3) 触发方法灵活多样。
- (4) 触发逻辑易于更新和修改。
- (5) 触发系统的死时间尽可能小。

1.4 论文工作内容和意义

大亚湾反应堆中微子实验是由我国主导、多个国家与地区参加的大型国际合作实验工程，利用大亚湾反应堆功率和天然的地理优势，积极推进并且逐渐取得成果的大型高能物理实验。

清华大学积极参与到这一重大的实验项目，承担了时钟系统和触发系统的设计与实现任务，为整个实验工程做出重要贡献。

本论文的主要工作是在研究触发系统设计前期工作的基础上，完善了局部触发模块的逻辑设计，完成了主触发模块的软、硬件设计和实现，进而搭建了触发系统的测试平台，测试了触发系统的基本性能，实现了大亚湾反应堆中微子实验对触发系统的要求，为这一重要的物理探测实验的顺利推进提供了良好的保障。目前，触发系统已经在实验现场安装完毕，运行良好。

1.4.1 论文各部分主要内容

论文第一章首先介绍了中微子振荡理论，大亚湾反应堆中微子实验的背景、实验布局、探测器和电子学结构。本章分析了触发系统的设计特点，提出了大亚湾反应堆中微子实验对电子学触发系统的指标。

第二章分析了大亚湾反应堆中微子实验触发系统的设计难点和特点。本章介绍了具体的触发系统整体设计方案

第三章详细介绍了触发系统的局部触发模块的逻辑设计，主要介绍了 Nhit 和 Esum 触发方式，并且根据现场不断调试的结果，设计了时钟报错逻辑、预分频逻辑等对调试和分析系统性能有帮助的逻辑。

第四章介绍了触发系统的主触发模块的逻辑设计，详细介绍了根据实际的物理探测方案而设计的或逻辑交互触发模式、反符合交互触发模式、回看逻辑交互触发模式以及刻度触发模式，并且根据现场的实际使用和调试需要，设计了八通道独立输出方式和预分频触发传送方式。

第五章介绍了触发系统的硬件实现，包括局部触发模块和主触发模块。

第六章介绍了测试系统，包括测试触发模块和上位机测试软件。测试系统主要用于在实验室测试触发系统的局部触发模块，并且分析局部触发模块的单板触发效率。

第七章主要介绍触发系统的性能，从多个角度研究了触发系统的触发效率，并且分析触发系统的死时间。

第八章总结了论文的主要内容，并对未来的工作做进一步的展望。

1.4.2 课题研究的意义和创新点

中微子实验是目前国际上在粒子物理方面竞争激烈，前景广大的实验。相比于国际上其他的中微子实验，大亚湾反应堆中微子实验的天然地理条件优越，反应堆功率高，理论预期精度好，是我国在探索中微子振荡理论方面的一个重大机遇，提高了我国在基础科学研究方面的国际地位和科研水平。

在该实验中，触发系统是数据处理和在线筛选事例的重要部分，不仅是高速

数字和模拟信号的复杂逻辑处理系统，而且触发方案的设计也需要考虑中微子探测的物理背景。为了获得高精度的测量结果，该实验中电子学的误差要小于 1%，这要求触发系统要保证很高的触发效率。

为了实现这一目标，根据大亚湾反应堆中微子实验的探测器特点和数据读出需求，本论文设计并实现了大亚湾反应堆中微子实验触发系统，包含以下创新：

1. 在局部触发模块的实现中，结合中微子反应式提出了 N_{hit} 和 E_{sum} 的三阈值触发方法；
2. 在主触发模块中提出了反符合交互触发模式和回看逻辑交互触发模式等与中微子探测物理方法密切相关的触发模式。

经过多次的电子学系统的联合调试，现场多系统的联合调试，逐步补充了时钟报错、预分频、标记被阻隔的触发信号等逻辑，为实验的顺利推进提供了重要保障。在 2011 年 8 月，大亚湾反应堆中微子实验观测到中微子事例^[44]。

第2章 大亚湾反应堆中微子实验触发系统的设计方案

2.1 触发系统的设计难点

大亚湾反应堆中微子实验根据中微子探测的物理背景,探测器的设计方案和探测精度,前端电子学数据类型,数据获取系统的传输要求,离线数据分析特点,对触发系统提出以下指标,如表2.1所示:

表2.1 电子学指标

项目	要求	判断依据
效率	大于99%	触发效率高以确保小的系统不确定性
触发最小时间间隔	13ns	有利于测量中微子俘获时间的延迟
能量阈值	~0.7MeV	接受更多的快信号
灵活性	动态算法	在各种条件下设计方案
同一性	偏差小于几个ns	多个子探测器的同一性
冗余性	多于1种算法	能够测量触发效率

因为大亚湾反应堆中微子实验的触发系统数据处理结构较为复杂,而且需要考虑中微子探测的物理背景,所以在逻辑设计方面需要提供多种触发方式,相互补充,提高触发效率。

因为大亚湾反应堆中微子实验对 θ_{13} 的探测精度要求高,所以需要尽可能降低实验中各个方面引入的系统误差,比如中心探测器结构设计和安装,中心探测器中的靶物质配方,屏蔽层和反符合探测器设计等。其中有一些系统误差是不可避免的,所以对电子学触发系统提出了更高的要求,尽可能减少在电子学触发系统方面的引入的系统误差。

触发系统的逻辑设计并不是一蹴而就的,需要循序渐进,逐步添加逻辑和提高性能。所以需要经过多次的电子学联合调试,现场多系统的联合调试,按照数据分析过程对信号处理方面添加的多种需求,不断的更新和完善触发逻辑。

2.2 触发系统的逻辑结构

大亚湾反应堆中微子实验的触发系统整体设计如图2.1所示:

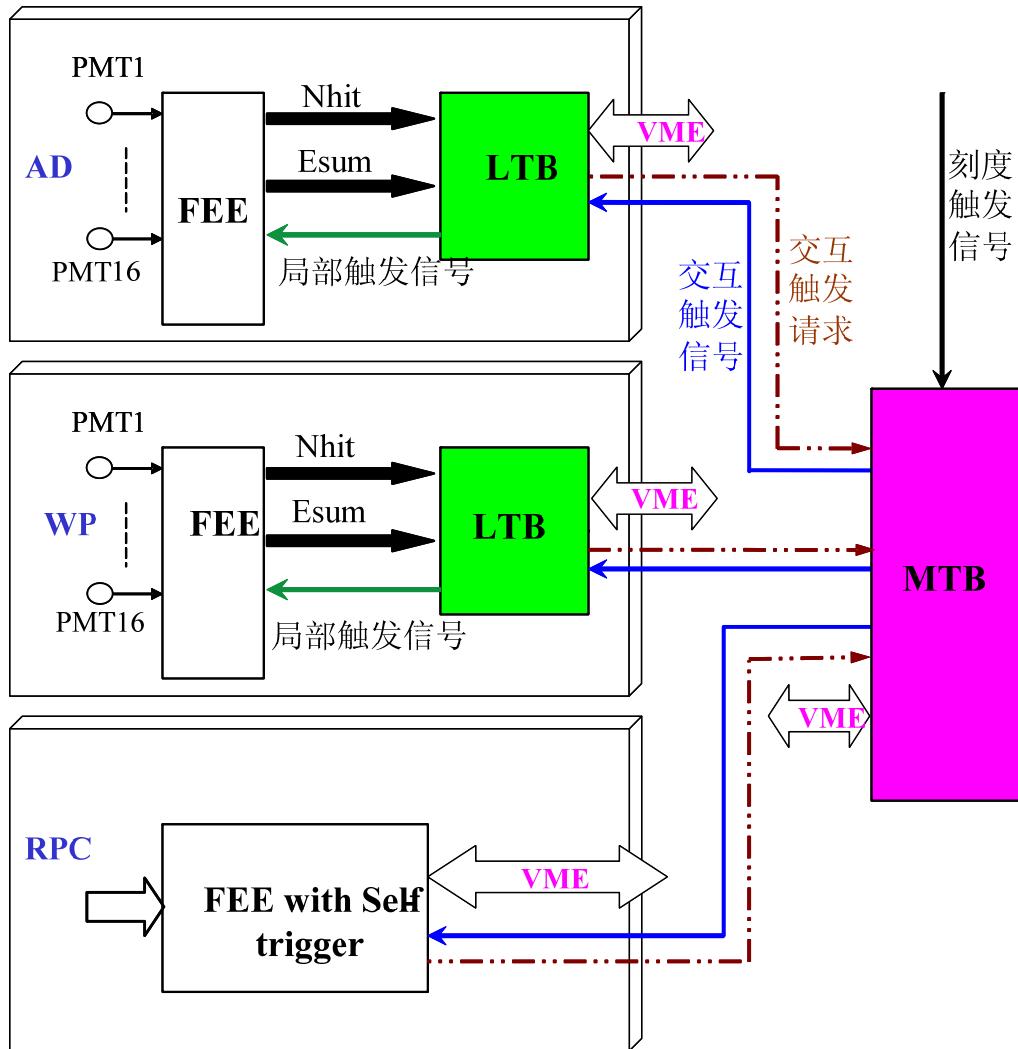


图2.1 触发系统方案

因为反电子中微子探测器（AD）和水契伦科夫探测器（WP）都采用光电倍增管作为探测器，所以这两种探测器都使用相同的电子学读出系统。因为阻性板室探测器的结构不同，所以使用独立的电子学和触发系统。每一个子探测器会传送交互触发请求给主触发模块做交互触发判选。

以反电子中微子探测器为例，介绍触发信号的产生过程：

(1) 当反电子中微子在探测器中发生反应，放出快信号以及慢信号时，释放出的光子信号会被光电倍增管接收，转化为电信号传递给前端电子学。

(2) 一个前端电子学模块最多接收 16 个光电倍增管的信号。前端电子学根据设定的阈值，判断每一个光电倍增管是否接收到光子信号，称为光电倍增管被击中。前端电子学会统计光电倍增管被击中的个数，并且把所有被击中的光电倍增管的信号累加起来得到能量和。这两种信息传递给局部触发模块：光电倍增管被击中的个数（Number of hit，即 Nhit）、沉积在被击中的光电倍增管内的能量

和 (Energy sum, 即 Esum)。其中 Nhit 是从 0 到 16 的数字信号, 而 Esum 是模拟信号, 以幅度表示能量的大小。

前端电子学同时会把每个光电倍增管被击中时的能量和时间信息放入缓存区, 等待数据获取系统通过触发信号来读取。

(3) 局部触发模块接收前端电子学处理之后的 Nhit 和 Esum 信号, 按照阈值的设定, 各自产生内部的触发信号。这些内部的触发信号按照“或”逻辑产生局部触发信号回传给前端电子学, 产生交互触发请求传给主触发模块, 并且把该触发信号的相关信息打包存储至缓存区, 同时发送中断请求给数据获取系统。

(4) 数据获取系统得到中断请求后, 会把局部触发模块和前端电子学的缓存区的数据读取出去, 存储到离线数据库。

(5) 主触发模块接收多个局部触发模块的交互触发请求, 使用交互触发逻辑产生交互触发信号, 返还给局部触发模块。主触发模块还发布刻度触发信号给所有子探测器的局部触发模块。局部触发模块可以把交互触发信号或者刻度触发信号打包到触发信息数据包里。

从这个流程可以看出, 数据获取系统读取数据的首要条件就是局部触发模块产生的局部触发信号, 而交互触发信息则包含在局部触发信号里面。

2.3 触发系统的特点

为了达到大亚湾反应堆中微子实验对触发系统的设计指标, 局部触发模块和主触发模块在设计时注意了以下几点:

(1) 局部触发模块内部工作主频是 80MHz, 主触发模块内部工作主频是 160MHz, 而且局部触发模块和前端电子学之间的 Nhit 信号传输是 80MHz SDR。这些因素都确保触发时间间隔小于 13ns, 并且交互触发的死时间小于 300ns。

(2) 局部触发模块设计了 12 种触发源, 而用于物理取数的 Nhit 和 Esum 触发各自都有很高的触发效率, 同时使用这两种触发模式, 可以相互弥补探测器的一些偏差。而且主触发模块内部都是全数字逻辑, 没有模拟信号, 触发效率可以达到 100%。整体触发系统的效率可以确保接近 100%。

(3) 能量阈值在最初的设计中就是可调节的, 经过不断联合调试和现场测试, 最终确定了精细的信号幅度分割方案, 使能量阈值低于 0.7MeV。

(4) 局部触发模块和主触发模块都设计了尽可能丰富而且合理的触发方案, 确保各种测试条件下都能正常运行。

(5) 为了实现所有局部触发模块的同一性, 专门设计并搭建了测试平台, 包括了触发测试板 (Trigger Tested Board, 即 TTB) 和测试软件, 全面测试局部触发

模块的各项性能，检查局部触发模块的每一个细节，降低系统误差。

(6) 局部触发模块和主触发模块在逻辑设计中，还预留了一些空间，在运行过程中，如果物理取数有新的需求，可以很容易的添加新的逻辑。而且硬件设计也保留了冗余的部分，可以很容易的修改和选择。

大亚湾的触发系统设计方案的优点如下：

(1) 局部触发模块和主触发模块的触发逻辑分别设计，在各自的逻辑中可以根据实际需要不断更新，提供更多的触发方式交叉互补，进一步保障了高触发效率的要求。

(2) 局部触发信号的产生并不受交互触发信号的影响，即便在不满足反符合逻辑的情况下，依然可以把每个子探测器的数据读取出去。

(3) 交互触发信号可以由多种方式产生，不仅可以实现反符合逻辑，也可以通过回看逻辑对符合中微子能谱的事例进行标记，对离线分析很有帮助。

(4) N_{hit} 和 E_{sum} 的“或”逻辑方案会减少漏触发。

(5) 交互触发信号是独立输出的，对于每一个子探测器来说，可以单独定制交互触发逻辑，这样的设计更加灵活方便。

根据以上的设计方案，需要逐步完善每一个触发模块中的细节部分，下面两章会分别详细介绍大亚湾反应堆中微子实验中的局部触发模块和主触发模块的逻辑设计。

2.4 小结

本章按照大亚湾反应堆中微子实验触发系统的指标要求，分析了大亚湾反应堆中微子实验触发系统的设计难点，介绍了触发系统的整体逻辑方案和数据读出流程，并且分析了触发系统的设计特点和优点。

第3章 局部触发模块的逻辑方案

3.1 局部触发逻辑的整体设计

局部触发模块旨在对一个探测器内部的所有光电倍增管的信号进行触发判选。图3.1是局部触发模块的外围结构图，显示了局部触发模块的与周边的模块连接状况以及主要工作。

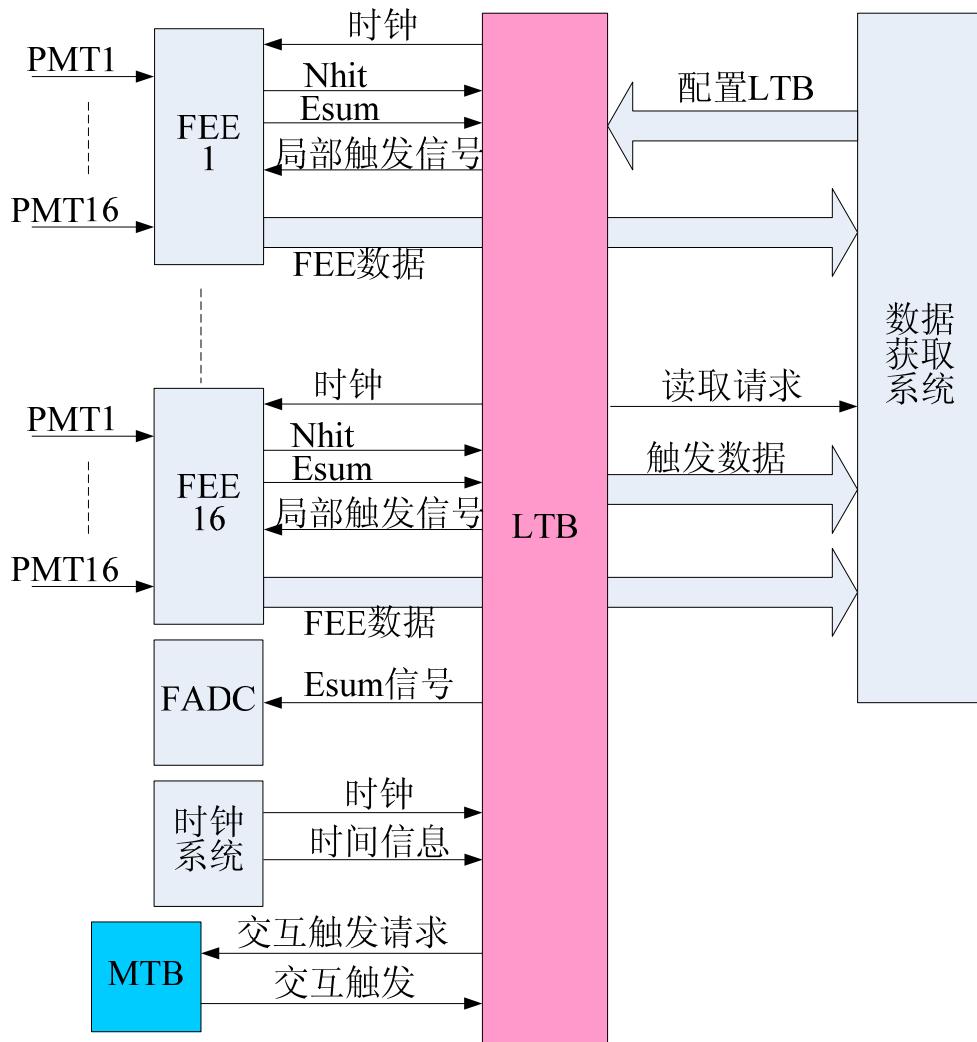


图3.1 局部触发模块的外围结构图

局部触发模块的主要工作包括：

(1) 局部触发模块接收来自时钟系统的时钟和时间信息，并且把时钟转发给所有的前端电子学。转发时钟是为了保持局部触发模块和前端电子学使用同步的时钟工作，这样可以消除时钟不同步所造成的数据对不齐等问题。

(2) 局部触发模块接收来自前端电子学的 Nhit 信号和 Esum 信号, 使用多种触发方式产生触发信号。在局部触发模块的内部逻辑设计中, 最重要一环就是触发信号的产生方式。

(3) 局部触发模块产生两类触发信号: 局部触发信号送给前端电子学、交互触发请求送给主触发模块。局部触发信号用于前端电子学打包数据, 交互触发请求用于主触发模块的交互触发逻辑判断。局部触发模块送出的两种触发类型完全独立, 可以根据实际的需要为两种不同触发类型打开或者关闭不同的触发源, 即这两种触发类型能够独立的选择各自的触发源来产生触发信号。

(4) 局部触发模块把触发信号的相关信息打包放置在缓存区内, 并且发送中断请求给数据获取系统。

(5) 在局部触发模块和前端电子学模块里, 数据都是保存在缓存区中的, 如果事例率过高, 缓存区被快速填满, 而数据获取系统还来不及将数据读取出去。所以在打包数据之前, 需要检查缓存区的数据存储情况, 包括局部触发模块和前端电子学模块的缓存区。

图 3.2 显示的是局部触发模块的内部逻辑, 包括了以上五部分主要工作。

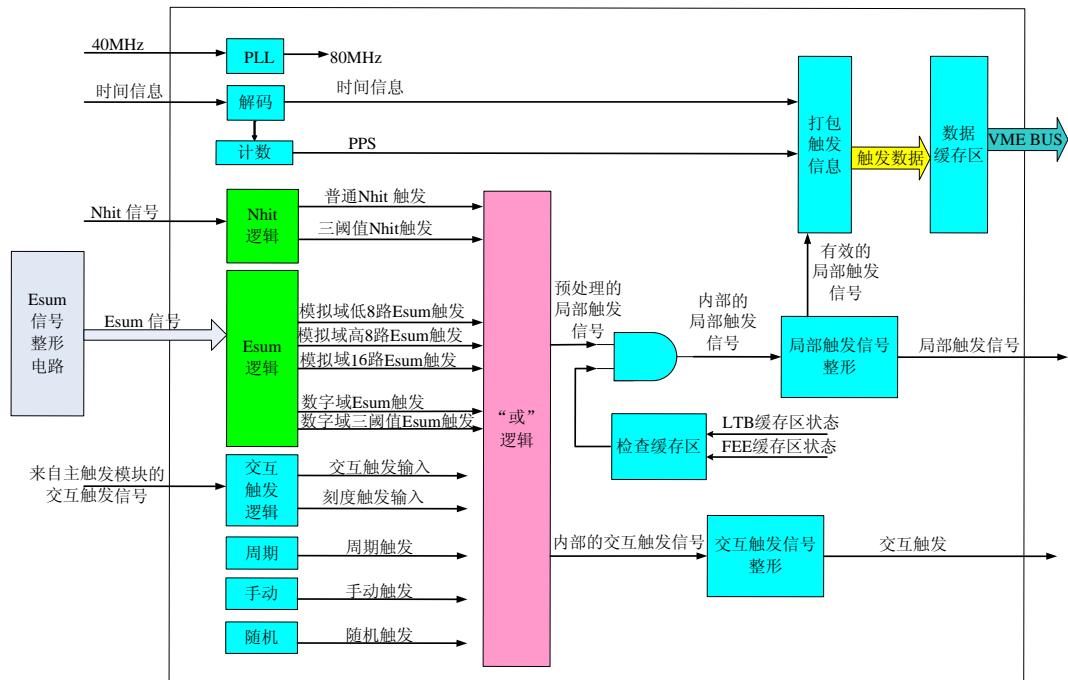


图3.2 局部触发模块的内部逻辑

为了便于调试和取数, 局部触发模块设计了 12 种触发源来产生内部触发信号。局部触发模块可以根据实际的需要打开或者关闭不同的触发源。其中最主要的两种触发源是 Nhit 和 Esum 触发源。

3.2 Nhit和Esum触发方式的比较

在一次物理事例中，Nhit 信号表示的是光电倍增管被击中个数的总和，Esum 表示的是沉积在光电倍增管中的能量总和。

虽然这两种独立的触发方式都显示了光电倍增管在获得光子信号时的状态，但是因为表达方式的不同，所以产生的触发信号也会有所差异。在实验取数时，为了提高触发效率，采用两种触发模式同时使用的方法，最终的局部触发信号由 Nhit 和 Esum 触发信号的“或”逻辑结果产生。

图 3.3 显示的是同样能量信号在反电子中微子探测器中被探测到时，因为位置不同而引起不同的结果。

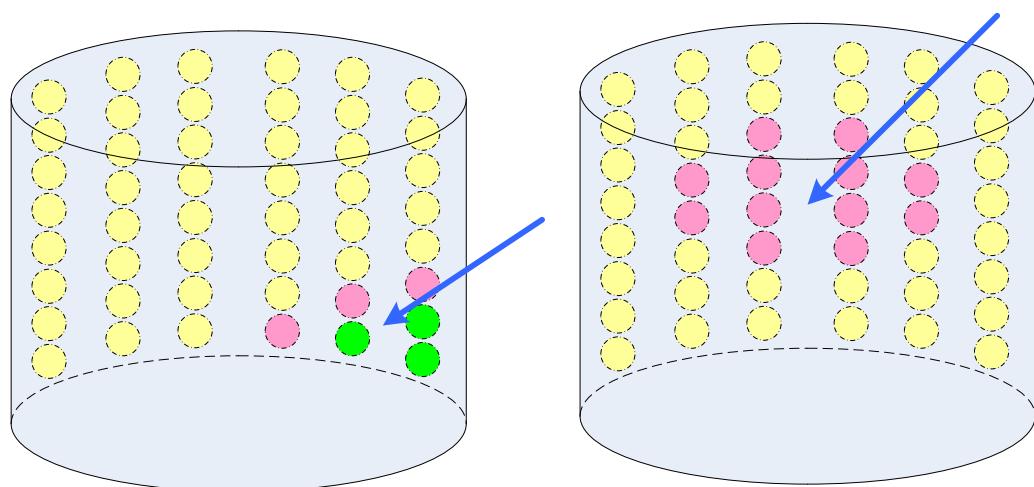


图3.3 不同事例位置的Nhit触发结果比较

图 3.3 的箭头指向实际的发光点位置。当光子信号产生时，光电倍增管沉积信号的能量与前端电子学的阈值进行比较，超过阈值的光电倍增管认为被击中。图中黄色的圆表示没有被击中的光电倍增管，紫色和绿色的圆表示被击中的光电倍增管，而且绿色圆表示光电倍增管沉积的能量是紫色圆的两倍。

从图 3.3 中可以看出，虽然两个信号的能量相同，但是左边的 Nhit 数值较小，为 6。右边的 Nhit 值为 12。在这种情况下，如果设定 Nhit 阈值为 7，那么左边的光子信号就不会产生 Nhit 触发，右边的光子信号就能产生 Nhit 触发信号。

相同能量的光子信号，由于在探测器内部产生位置不同，被击中的光电倍增管的数量有可能不同。当光子信号发生在探测器边角的位置，这种差别尤为明显。

图 3.4 显示的是另外一种差别，即 Nhit 相同 Esum 不同的两种信号在探测器中的触发结果。

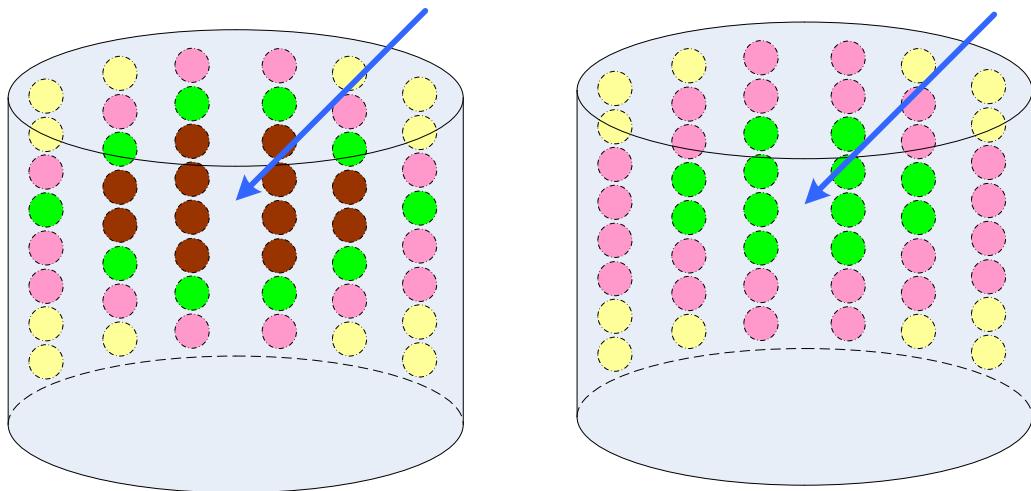


图3.4 不同Esum信号的触发结果比较

图3.4的箭头指向实际的发光点位置。图3.4中两个Nhit相同的光子信号被光电倍增管俘获，但是能量不同。颜色越深，表示光电倍增管中沉积的能量越大。

由此可以发现，当一些能量较大的光电子信号产生时，几乎所有的光电倍增管都被击中，而这些较大的信号的能量却大不相同。在产生触发信号时也需要考虑能够区分这种不同。

由于这种差别，Nhit和Esum触发的逻辑方案需要对称且互补，即为Nhit设计的触发方式，也要尽量为Esum提供，可以利用两种触发方式的区别研究探测器和触发系统的性能。

在实验运行取数时，同时使用Nhit和Esum两种触发方式，并且由Nhit和Esum的“或”逻辑产生内部的局部触发信号，并进行触发数据的打包和传送。

3.3 Nhit触发模式

Nhit触发模式根据来自前端电子学的光电倍增管击中数目来产生触发信号。在调试和测试的过程中，不断改进Nhit触发逻辑，最终设计了两种Nhit触发方式：普通Nhit触发，三阈值Nhit触发。

3.3.1 普通Nhit触发

普通Nhit触发产生方式比较简单，如果Nhit信号超过设定的Nhit阈值，就产生触发，如图3.5所示：

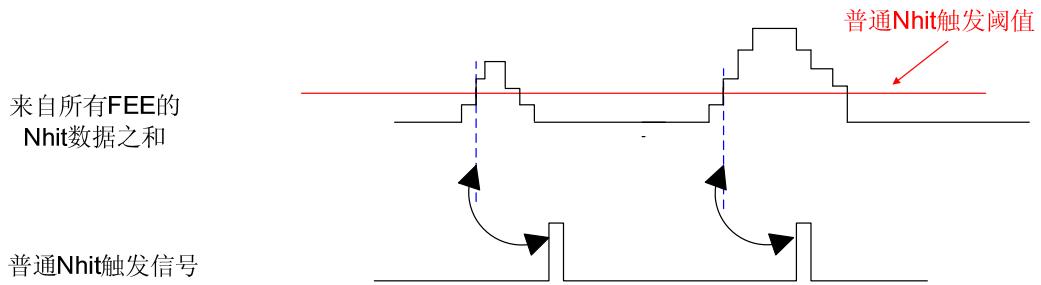


图3.5 普通Nhit触发产生过程

这种触发方式是最简单的一种，它能够快速的产生触发信号，Nhit 信号一旦超过阈值，就能立即产生触发信号，但是有个缺点：在产生触发信号时，不能预知信号的峰值。数据打包时，也就不能从触发信息中获得信号的峰值。

3.3.2 三阈值Nhit触发

三阈值 Nhit 触发是为了区分来自前端电子学的不同 Nhit 信号幅度，获得信号峰值，并且可以在线的去掉一些特别大的宇宙线 μ 子信号。

三阈值 Nhit 触发有三个阈值：Nhit 低阈值、Nhit 高阈值和 Nhit 限制阈值。为了使用更加灵活方便，还有一个限制阈值使能开关。

图 3.6 显示了三阈值 Nhit 触发信号的产生过程，限制阈值使能开关为“0”，即不使用限制阈值。

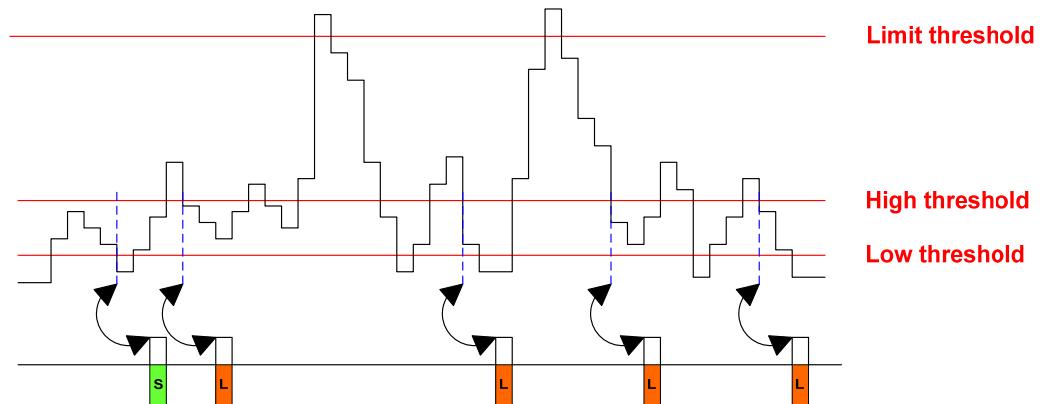


图3.6 不使用限制阈值时的三阈值Nhit触发信号产生过程

从图 3.6 中可以看出，因为 Nhit 触发信号会在信号低于阈值之后才产生，所以在触发信号产生时获得信号的峰值，而且会将峰值与阈值作比较，判断这个信号的幅度。如果信号幅度大于 Nhit 低阈值而小于 Nhit 高阈值时，就产生小信号的 Nhit 触发，图中的绿色方块表示小信号。如果信号大于 Nhit 高阈值，就产生大信

号的 Nhit 触发，图中的橙色方块表示大信号。

因为在传送给数据获取系统的触发数据中，大信号和小信号的 Nhit 触发是各自独立的触发源，所以通过离线数据的触发信息，可以很容易的知道该触发信号所代表的实际光电倍增管信号的大小。

另外，在触发系统的主触发模块里，交互触发逻辑需要根据光电倍增管信号的幅度和时间关系判断产生交互触发信号，所以需要在局部触发模块里判断信号的幅度。

图 3.7 显示了三阈值 Nhit 触发信号的产生过程，这时的限制阈值使能开关为“1”，即使用限制阈值。

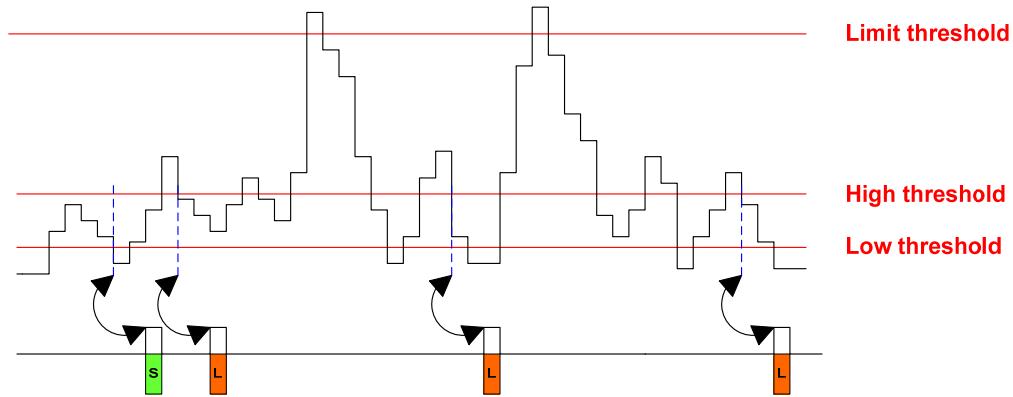


图3.7 使用限制阈值时的三阈值Nhit触发信号产生过程

使用限制阈值时，当信号幅度超过限制阈值，就不产生 Nhit 触发信号，这样可以在线的去掉一些幅度特别高的 Nhit 信号，因为一些宇宙线 μ 子的信号能量要远远大于中微子事例的能量。

因为三阈值 Nhit 的触发是在 Nhit 信号低于 Nhit 阈值时产生的，这点与普通 Nhit 触发的区别可以有效的消除因较大的宇宙线 μ 子信号在光电倍增管中产生反复过冲而带来的影响。在线剔除这样的信号，能够让数据获取系统获得更有价值的数据。

3.4 Esum 触发模式

Esum 触发是根据一次事例中所有光电倍增管沉积的能量总和来产生触发。因为 Esum 是模拟信号，不仅在硬件电路上需要对波形进行整形，而且在固件设计中也设计了两种可以相互比较的触发方式。

Esum 信号是由前端电子学对光电倍增管信号进行整形处理后的模拟信号，而 Esum 阈值是数字信号，数据获取系统通过 VME 总线将 Esum 阈值写入局部触发

模块的 FPGA (Field Programmable Gate Array) 内。所以 Esum 信号和阈值分别是模拟信号和数据信号，在触发判决时，按照比较方式的不同，分为两种 Esum 触发方法：模拟域的 Esum 触发和数字域的 Esum 触发。

图 3.8 显示 Esum 信号经过整形和后分为两路，一路是将模拟信号数字化，然后与数字阈值进行比较，产生触发信号。另一路是将数字阈值模拟化，然后使用模拟信号比较芯片，将模拟阈值和模拟信号作比较，产生触发信号。

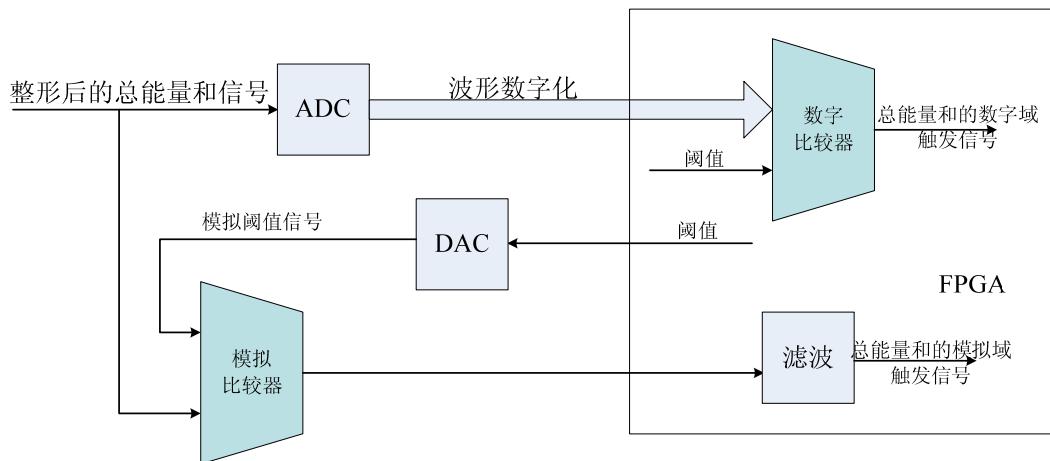


图 3.8 模拟域的 Esum 触发和数字域的 Esum 触发

Esum 的这两种不同比较方式的触发逻辑，可以相互检验。

3.4.1 模拟域的Esum触发

把数字阈值转换成模拟量，然后使用模拟比较芯片，将阈值的模拟信号与 Esum 模拟信号作比较，产生 Esum 触发信号。为了对比不同 Esum 输入信号通道的不同差别，设计了三种触发源：低 8 路 Esum 触发，高 8 路 Esum 触发和全 16 路 Esum 触发。

图 3.9 显示了模拟域的 Esum 触发信号产生过程。采用 ADCMP561 作为模拟比较芯片。当 Esum 信号小于 Esum 阈值时，模拟比较芯片输出“0”，反之输出“1”。所以经过模拟比较芯片进行阈值比较之后，输出的信号是数字的“0”和“1”的信号。噪声信号比较窄，经过数字滤波之后，去掉噪声信号。所以当信号宽度超过一定数值时，才将该信号作为触发信号。

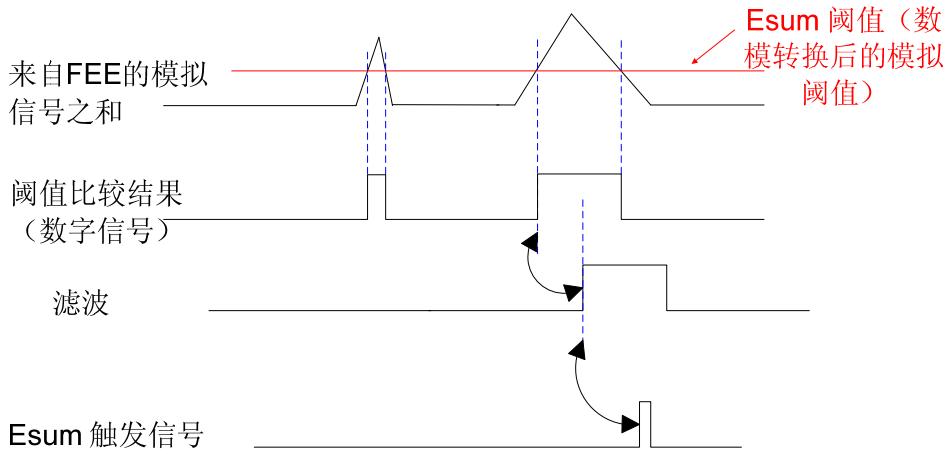


图3.9 模拟域的Esum触发逻辑

这种触发方式比较快捷，经过几个时钟周期的信号宽度测量，就能产生 Esum 触发信号。

3.4.2 数字域的Esum触发

Esum 模拟信号经过 ADC (Analog to Digital Converter) 芯片转换成数字信号，然后用数字阈值对数字信号进行触发判断。

图 3.10 显示了数字域的 Esum 触发信号的产生过程：

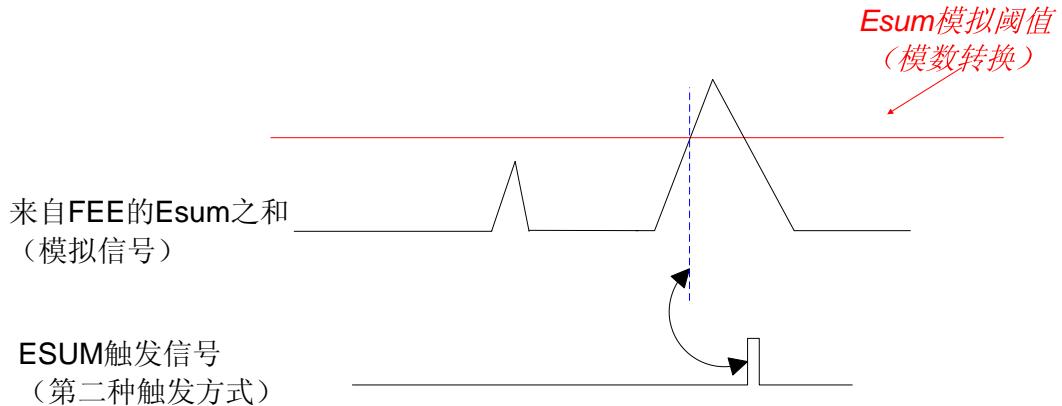


图3.10 第二类Esum触发方式产生过程

这种触发方式在产生触发信号时，不能得知信号的峰值。所以参考三阈值 Nhit 触发产生逻辑，基于数字域的 Esum 触发方式，设计了三阈值 Esum 触发逻辑。

3.4.3 数字域的三阈值Esum触发

基于数字域的 Esum 触发基础上，设计三阈值 Esum 触发方式：

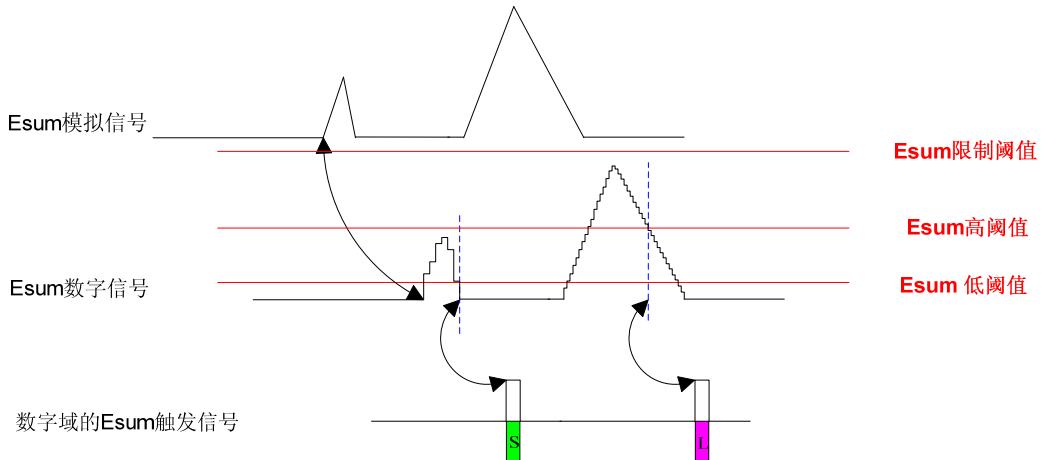


图3.11 Esum三阈值触发方式

三阈值 Esum 触发的产生方式和三阈值 Nhit 触发是一样的，都有限制阈值使能开关和三种阈值。3.3.2 节中有详细介绍，这里就不再赘述。

Nhit 和 Esum 的三阈值触发逻辑相互对称，确保了 Nhit 和 Esum 两大类触发方式的互相补充。

3.5 其他触发源

局部触发模块能够使用 12 种触发源产生两种类型的触发信号。前面介绍了 Nhit 普通触发、Nhit 三阈值触发、Esum 低八路通道触发、Esum 高八路通道触发、Esum 十六路通道触发、Esum 数字域触发和 Esum 三阈值触发共七种触发源。

除此之外还有交互信号输入触发、刻度信号输入触发、周期触发、手动触发、随机触发共五种触发源。

(1) 交互信号输入触发源

交互信号是通过主触发模块来自其他子探测器系统的局部触发模块。这就是主触发模块传给局部触发模块的交互触发信号。在局部触发模块内部，它是一个独立的触发源。

(2) 刻度信号输入触发源

刻度输入信号触发是通过主触发模块来自刻度系统。这就是主触发模块传给局部触发模块的刻度触发信号。

(3) 周期触发源

周期触发是局部触发模块按照设定的周期产生触发信号，可以用于触发信号时间间隔的测试，也可以用周期触发强制取数来分析本底。

(4) 手动触发源

手动触发是通过上位机实现的，即上位机通过控制寄存器，强制局部触发产生一个触发信号。这种触发方法主要用于测试硬件的连通性。

(5) 随机触发源

两个触发信号的时间间隔是随机数，这种触发叫做随机触发。它可以用于测试数据获取系统承受随机触发信号能力，也可以强制取数来分析本底。图 3.12 显示的是随机触发信号产生的过程。

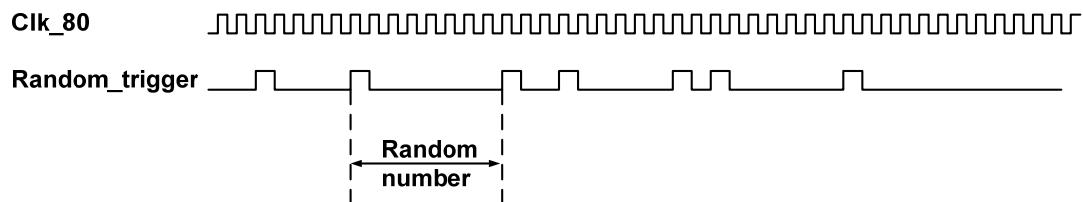


图 3.12 随机触发信号

3.6 触发数据包

局部触发模块使用 12 种触发源生成了内部触发信号，并且保存了关于该出发信号的所有信息：触发信号的编号，触发产生的时、触发类型和来自前端电子学的信号幅度等实际信号信息等等。

还有一些关于局部触发模块内部的信息也需要存储，例如局部触发模块内部的缓存情况。

数据获取系统读取局部触发模块触发信号时有一些协定信息，这些信息也需要记录下来，便于数据获取系统查找。

另外，因为数据获取系统只能通过局部触发模块的局部触发信号来读取数据，所以有一些跟局部触发模块相关联的电子学，它们的信息也需要通过传递给局部触发模块，然后由局部触发模块记录下来，最终通过触发信号，由数据获取系统读取至离线。例如时钟系统和主触发模块的信息。

触发数据包的格式如图 3.13 所示：

Trigger data frame													
Bit31					Bit0								
0000	A	G	T	C	ILT SN, 6b	ROT ,2b	Trigger type 16b						
0000	R,12b				Days,10b			Hour,6b					
0000	R,4b	Accu, low4b		Nano, low4b	0	0	Minute,7b	Second,7b					
0000	Nanosecond(0.5 ns), high28b												
0000	Accumulation(0.5 ns), high28b												
0000	R,3b	HSUM,9b			ESUM comp data,3b	ESUM ADC data sum in100ns, 12b							
0000	F	L	Blocked valid trigger 10b			Cross trigger source17b							

图3.13 触发数据包

因为VME总线传输的数据是32位的，所以数据包以32位为单位进行传送。为了减少数据量和传送尽可能多的信息，很多局部触发模块记录的信息是由多个字拼凑成的，而为了以后的调试和扩展，也预留少量的位置。

3.7 标记丢失触发信号的逻辑

在局部触发模块和前端电子学模块中，都有数据缓存区。当触发信号频率过高时，缓存区中的数据很快被填满，而数据获取系统又来不及把数据读取出去，这时候如果产生新的触发信号，就会被丢掉，这就造成了电子学的死时间。死时间不可避免，但是需要标记出来，为电子学性能分析提供帮助，为改善触发逻辑和调整触发阈值提供依据。

获取死时间的方法就是，在触发数据包中标注出这个触发信号和上一个触发信号之间的时间内，被丢掉的触发信号的个数。死时间等于丢掉的触发信号个数和触发信号的平均周期的乘积。其中触发信号的平均周期可以由触发信号的事例率的倒数得到。这种方法能够简单快速的计算死时间。虽然结果较为粗略，并不是非常精确的死时间信息，但对于分析电子学性能已足够用。

3.8 预分频逻辑

在调试初期，为了能够调整电子学的最低触发阈值尽可能小，需要调整电子学的增益。而阈值越低，触发信号太多，数据拥堵，无法读取，反而很难分析该如何调整阈值。

所以本论文设计了一种预分频逻辑，充分利用时钟系统交给触发系统的时间信息平均的把触发信号去掉一些，让数据系统能够获得数据，从而分析数据，调整增益。

时钟系统送入局部触发模块的时间信息包含 PPS (Pulse Per Second)，即每秒一个脉冲信号。预分频逻辑就是按照这个脉冲信号，把一秒的时间段平均分为若干段，每隔一段把触发信号送给前端电子学存储数据。这样就能平均的扔掉一些触发信号，只要取数时间延长一些，同样能够获得足够量的数据来分析电子学性能，还不会造成数据拥堵。图 3.14 显示了预分频的过程。

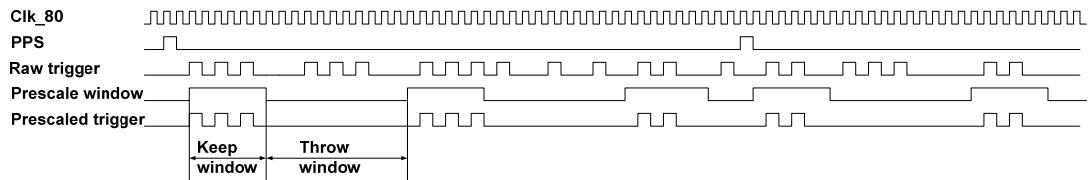


图 3.14 按照 PPS 对触发信号进行预分频处理

图 3.14 中“keep window”内部的触发信号会被保存至离线数据库，而“throw window”内部的触发信号就会被丢掉。每当新的 PPS 信号到来时，就会重新开启“keep window”。这个功能在调试初期起了重要的作用。

3.9 时钟报错机制

稳定的时钟是整个电子学工作的最重要保障，精确的时间信息是数据分析的重要依据，所以在大亚湾反应堆中微子实验中，设计了单独的时钟系统来保障时钟的稳定和时间的精确。

但是万一时钟系统发生故障，因为各种原因无法送出时钟给触发系统，整个电子学就不能正常工作。在这种情况下，需要通知多方面的人员获得时钟系统已经出错的这一重要信息。在线值班人员需要知道，然后尽快检查故障。数据获取系统需要知道，尽快停止取数。离线分析的人员也要通过数据知道，已经存储的部分数据中，时钟已经出错，数据不能使用。所以当时钟出错时，需要在多个方面给出提示。

时钟系统需要送给局部触发模块 40MHz 时钟信号。局部触发模块可以利用硬件上的 CPLD 的晶振时钟和时钟系统送入的时钟进行对比，如果时钟频率在 39MHz 到 41MHz 之间，都认为时钟是稳定可以使用的。除此之外就要立即报警。主要在三个方面进行提示：一是在硬件的前面板上亮起红灯，在线值班人员可以得知时钟出错；二是在数据包的开头位置增加标志位以提示数据获取系统；三是在数据内部增加标志位，让离线分析人员通过数据得知这一信息。这一方案在调试时钟系统和现场多系统连调时起了重要作用。

3.10 小结

本章详细介绍了局部触发模块的逻辑，从整体设计到触发逻辑的每个细节，都做了详细的阐述。其中，Nhit 触发和 Esum 触发是与中微子探测的物理背景相关的。其他一些触发逻辑和监测逻辑是与实验调试相关的。

这些对局部触发逻辑的改进充分说明触发系统是需要不断完善的，不能一次设计完成所有预想。一些问题和实际需求也是在实验的逐渐推进过程中才慢慢发现的，经过联合调试才能逐步实现完整的触发逻辑。

第4章 主触发模块的逻辑方案

4.1 主触发逻辑的整体设计

主触发模块关注于多个子探测器之间的信号交互，需要了解中微子探测到物理背景，分析反电子中微子探测器、水契伦科夫探测器、阻性板室探测器之间的信号关系。图 4.1 显示的是主触发模块与周边的模块连接状况以及主要工作。

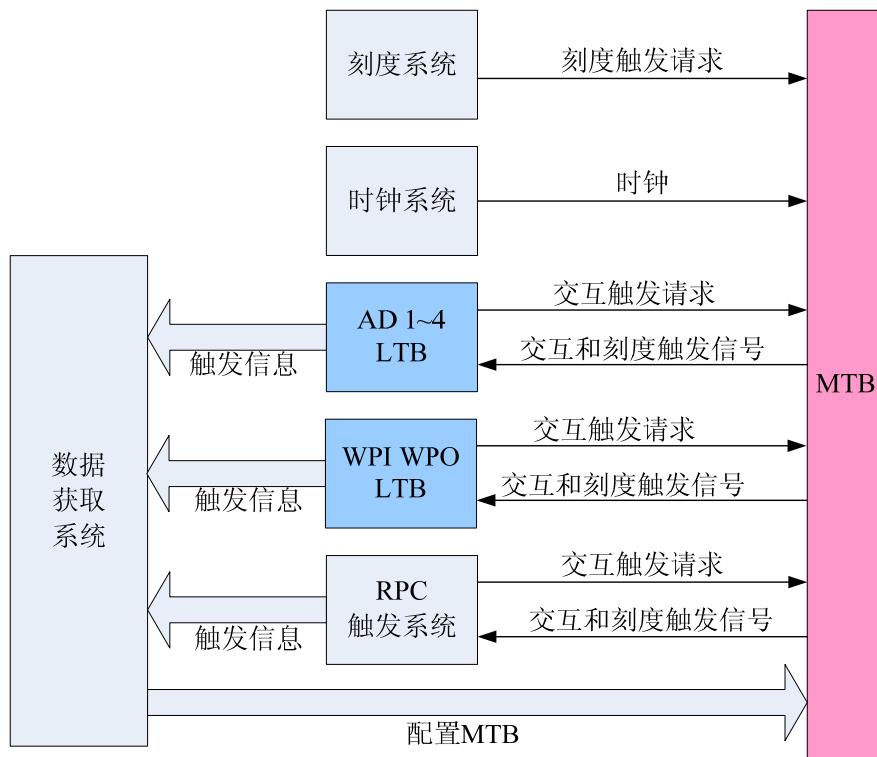


图4.1 主触发模块的外围结构图

主触发模块的主要工作：

- (1) 主触发模块收集来自多个子探测器的局部触发模块的交互触发请求信号，并且根据物理需求，选择合适的交互触发逻辑，产生交互触发信号返还给局部触发模块。
- (2) 主触发模块接收来自刻度系统的刻度触发信号，并把它发布给所有需要的局部触发模块。
- (3) 为了调试方便，主触发模块内部添加了周期交互触发、手动交互触发、周期刻度触发和手动刻度触发信号。
- (4) 产生的交互触发信号和刻度触发信号经过串行编码传送给局部触发模块。

(5) 为了保证不同的子探测器采用各自独立的交互触发逻辑, 主触发模块需要采用八通道的独立设计方案。

(6) 为每一个输入输出通道提供延时逻辑、触发信号计数逻辑、前面板信号提示逻辑, 为调试提供方便。对于任意输入输出通道来说, 当有一个触发信号经过, 无论是交互触发请求、刻度触发信号, 还是交互触发信号, 在主触发模块的前面板上对应通道位置的 LED 灯会亮起一次, 同时对应通道的计数器会增加一次。这些逻辑为现场调试提供了诸多便利。

图 4.2 是主触发模块的内部逻辑, 包括了以上逻辑。

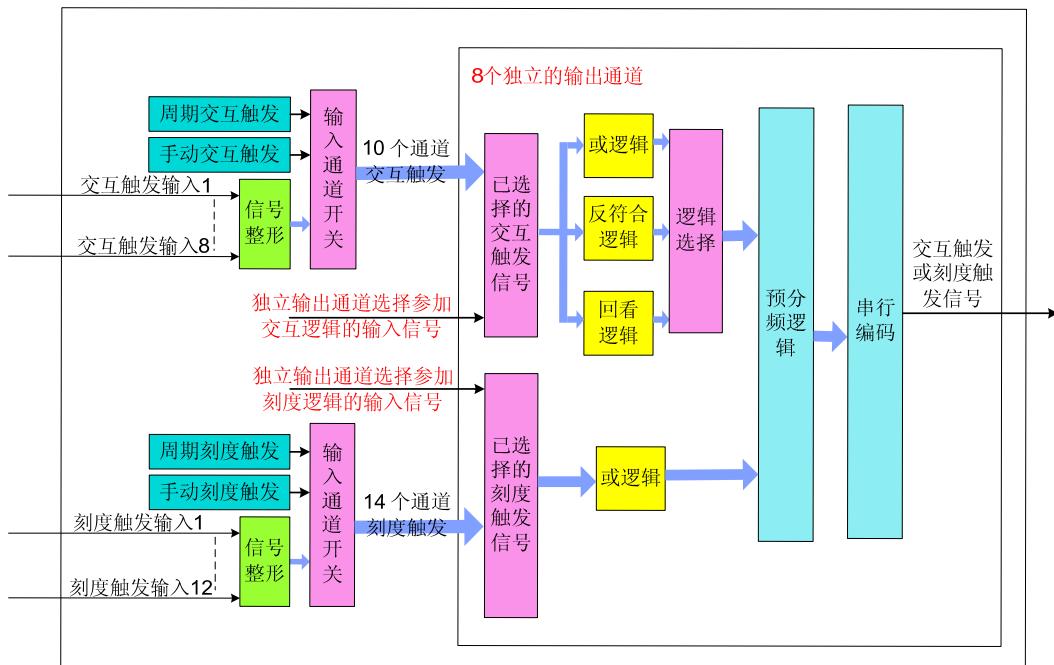


图 4.2 主触发模块的内部触发逻辑

交互触发是多个子探测器之间的触发信号交互, 主触发模块设计了三种交互触发逻辑以实现不同的目的。这三种交互触发逻辑是: 或逻辑、反符合逻辑和回看逻辑。

4.2 或逻辑触发

或逻辑交互触发的目的是: 当某个子探测器有数据需要读取时, 让其他子探测器也读取数据。即某个子探测器探测到物理事例信号, 并产生局部触发时, 同时发出交互触发信号, 请其他子探测器也同时读取数据, 这样做的目的是为了最大限度的获得任何触发信号产生时, 整个探测器内部的情况。

图 4.3 是或逻辑交互触发产生过程。交互触发类型表示该触发信号是由哪个子

探测器的交互触发请求产生的。这个信息会通过主触发模块传递给局部触发模块，并且保存在局部触发模块产生的触发数据包里。

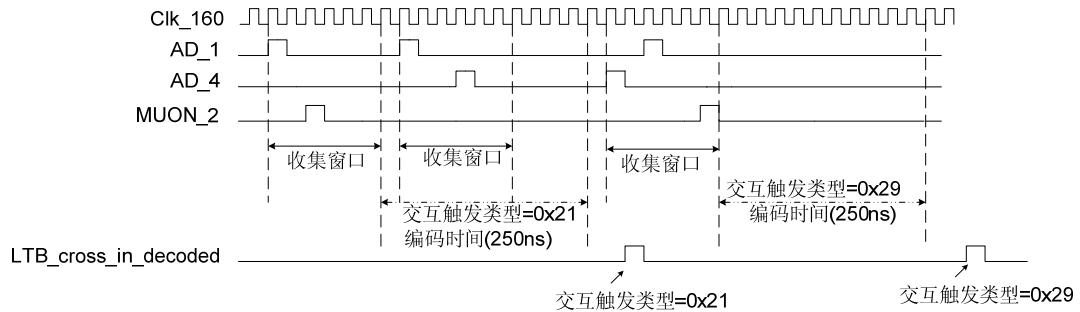


图4.3 或逻辑交互触发

但是或逻辑交互触发会导致事例率会急剧上升，加重数据获取系统传输数据的压力。在调试和取数的很难使用这样的触发方式，会造成事例拥堵。

4.3 反符合触发

宇宙线事例在反符合探测器内部被捕捉到时，主触发模块把中心探测器的局部触发信号屏蔽掉，使中心探测器不能产生局部触发信号，从而不再读取数据。这是在线去掉宇宙线事例的方式。

当水契伦科夫探测器或者阻性板室探测器有局部触发信号时，表明反符合探测器的光电倍增管获得了宇宙线 μ 子信号，主触发模块将会在 μ 子信号的前后打开反符合窗口，窗口内的反电子中微子探测器的局部触发信号都不会得到交互触发信号。反符合窗口之外的反电子中微子探测器的局部触发信号得到交互触发信号，并读取数据。

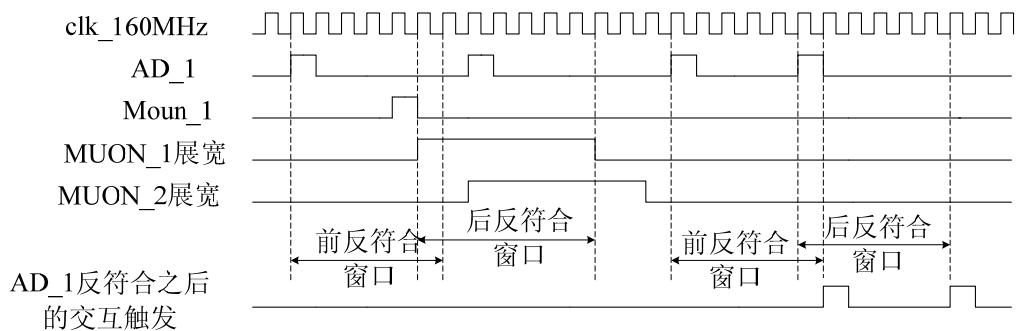


图4.4 反符合交互触发方式

图4.4中“MUON”指水契伦科夫探测器，它的局部触发模块产生的交互触发请求信号作为反符合信号。在进行反符合逻辑时，需要先把反符合信号展宽，在

反符合信号前后一段时间内，如果反电子中微子探测器有交互触发请求，都会被去掉。反符合是在线筛选事例的方法。

4.4 回看触发

回看逻辑的交互触发是与大亚湾反应堆中微子实验的探测过程密切相关的。中微子信号的特点是快信号和慢信号在时间和能量上的符合。公式 1-5 至 1-8 表明了快信号和慢信号的能量和时间。

其中快信号正电子湮灭产生的能谱如图 4.5 所示，能量范围从 1MeV 至 8MeV：

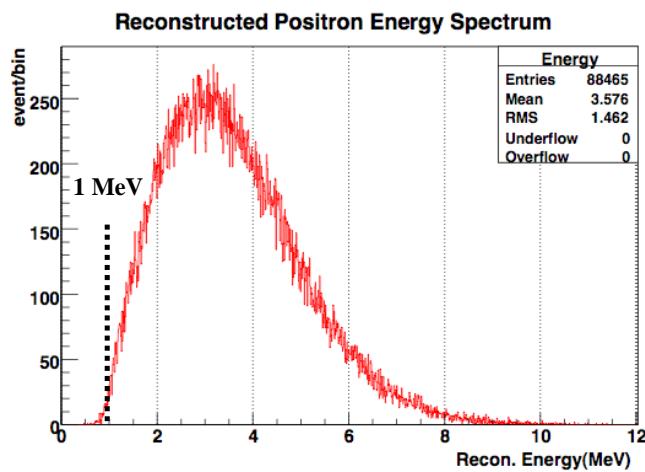


图4.5 快信号能谱

延迟信号的能谱如图 4.6 所示，中子被质子俘获 (n-p)，放出的光子能量是 2.2MeV，反应截面 0.3b，延迟时间大约是 200us。中子被钆俘获 (n-Gd)，放出光子能量是 8MeV，反应截面 50kb，延迟时间大约 28us。

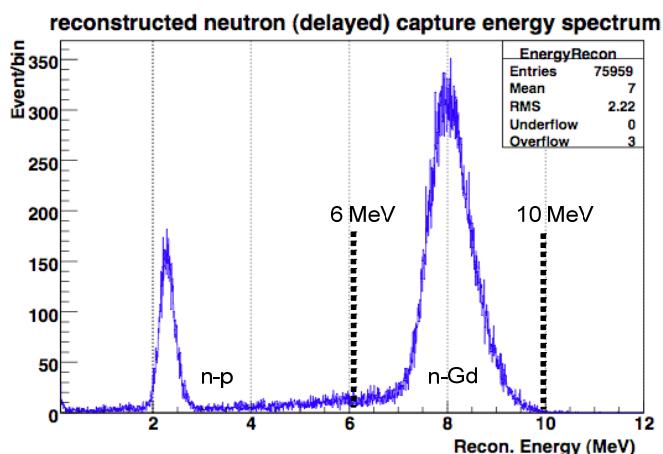


图4.6 延迟信号能谱

从图4.6可以看出，中子被钆俘获的反应截面大，延迟时间短，放出光子能量高，所以探测器靶物质选用掺钆的液体闪烁体以提高中子的俘获几率。

回看逻辑的交互触发步骤为：

(1) 局部触发模块使用三阈值的 Nhit 或者 Esum 触发方式，判断前端电子学送来的光电倍增管信号，区分信号的大小。

(2) 局部触发模块把信号幅度的信息通过交互触发请求信号传递给主触发模块。

(3) 主触发模块使用反符合方式，去掉和宇宙线事例相关的数据。

(4) 在经过反符合逻辑处理之后的交互触发请求信号中，根据不同的信号幅度，产生不同的回看交互触发。

(5) 如果三阈值 Nhit 和 Esum 的低阈值设定在 1MeV，高阈值设定在 6MeV 那么正电子湮灭产生的快信号是小信号，中子被钆俘获的放出的光子信号是大信号，这种情况下会产生回看交互触发类型 1。快信号有一部分能量超过 6MeV，所以如果大信号和大信号时间间隔小于设定的时间窗口，同样也会被判断为回看交互触发类型 1。

(6) 中子被质子俘获产生的光子信号在上述阈值设定情况下，会被判定为小信号，小信号和小信号的时间符合，会产生回看交互触发类型 2。

(7) 主触发模块把回看交互触发的类型进行串行编码，通过交互触发的信号通道传递给局部触发模块，并且记录在触发数据包内。

(8) 离线数据分析时，可以通过数据包中标记的回看类型，检查数据，寻找中微子事例。

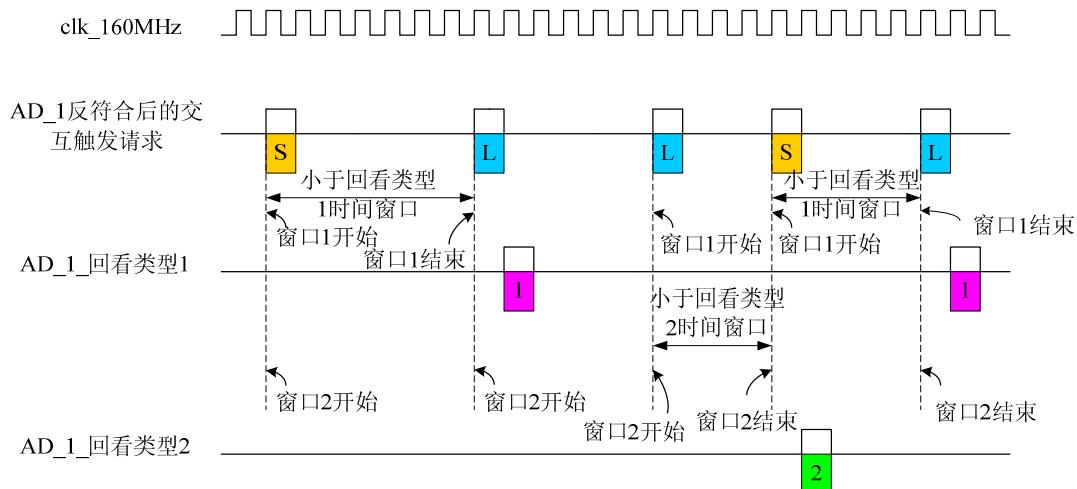


图4.7 回看触发方式

图4.7中橙色方块表示小信号，蓝色方块表示大信号，紫色方块表示回看类型

1, 绿色方块表示回看类型 2。经过反符合之后的反电子中微子探测器的信号, 会根据信号的大小来产生不同的回看交互触发信号。例如, 小信号在前, 大信号在后, 而且时间间隔小于时间查询窗口, 就会产生回看类型 1 的交互触发信号。反之产生回看类型 2 的交互触发信号。

这种交互触发信号非常有利于离线分析, 而且可以适当的调整时间查询窗口和三阈值触发方式的阈值, 对光电倍增管的信号做进一步的分析。

4.5 触发数据传送

数据获取系统只能通过局部触发模块的触发数据包获得主触发模块的交互触发和刻度触发信息, 所以主触发模块内部的触发信息需要传给局部触发模块, 然后由局部触发模块将主触发模块的信息打包。主触发模块的信息包括交互触发类别和来源编号。

图 4.8 是主触发模块传送的串行码格式, 表示交互触发和刻度触发的类型和来源。

交互触发类型 3bit	手动触发源 1bit	周期触发源 1bit	输入触发源 12bit
----------------	---------------	---------------	----------------

图 4.8 主触发模块的数据格式

表 4.1 是交互触发类型。

表 4.1 交互触发类型对照表

交互触发类型	触发逻辑
000	或逻辑交互触发
001	反符合交互触发
010	回看类型 1 交互触发
011	回看类型 2 交互触发
100	刻度触发

4.6 独立输出通道

以大亚湾反应堆中微子实验的远点实验厅为例, 一共有 4 个反电子中微子探测器, 2 个水契伦科夫探测器, 1 个阻性板室探测器, 总共 7 个交互触发信号通道。为了设计冗余, 最终设计了 8 个独立的输出通道, 每个通道可以定制自己的交互

触发逻辑。

因为每一个通道都要能独立完成上述所有逻辑，不受其他通道的逻辑影响，而且为了减少串行编码的时间，主触发模块的工作主频率比局部触发模块高，达到 160MHz。所以导致主触发模块的 FPGA 资源非常紧张，经过调试，改用逻辑单元是局部触发模块 FPGA 逻辑单元 1.5 倍的同系列同样封装的 FPGA，而且在编写固件时，进行了代码优化处理以节省资源。

4.7 小结

本章详细介绍了主触发模块的逻辑设计，包括主触发逻辑的整体设计、主要工作、交互触发的三种逻辑、刻度触发、触发信息传输、独立输出通道等，从整体到细节，每一个部分都做了详细的阐述。

主触发逻辑也是在不断改进和调整过程中逐步完善的，而且主触发逻辑的设计需要考虑局部触发逻辑，相互辅助并交换信息。所以主触发逻辑和局部触发逻辑是同时更新和逐步完成的。

第 5 章 触发系统的硬件实现

触发系统的硬件分为局部触发模块和主触发模块两个部分。按照实验需求，包括现场使用和备份，总共需要生产完成 19 块局部触发板，4 块主触发板。本论文对已有的 5 块局部触发板进行调试和测试，并且设计完成了 4 块主触发板，本章将重点介绍主触发板的设计。

5.1 硬件设计原则

硬件设计采取以下几个原则：

- (1) 采用高能物理实验中较为广泛使用 VME 总线，便于调试和和保持同一性，减少系统误差。
- (2) 触发系统的硬件包括数字信号电路和模拟信号电路，而且都采用差分信号，逻辑代码都由 FPGA 实现。
- (3) 在这三个模块中，凡是能够使用相同的硬件电路，就采用一致的硬件设计，而且保留相同的冗余设计。
- (4) 在调试初期，为 FPGA 提供多种配置方式，并最终在实验中采用在线配置方式更新 FPGA 程序。

这样的硬件设计原则为绘制印刷电路板提供了很大便利，而且硬件调试也相对容易。

5.2 主触发模块硬件

主触发板只有数字电路，而且所有数字电路采用差分信号传输。

5.2.1 FPGA 及其配置电路

主触发板的 FPGA 选用 Xilinx 生产的 Virtek4 系列 FPGA 芯片 XC4VLX40-10FF668C。这款 FPGA 有 41472 个逻辑单元，1728k bits RAM，封装是 668 引脚的 BGA 封装，单端的 I/O 端口的最大提供量是 640 条，也可以使用差分的 I/O 端口，最多是 320 对。

FPGA 设计了三种配置方式，都有各自的用途，最终用于实验运行的是第三种，其他两种都是调试初期不可缺少方案。图 5.1 显示了三种配置方案的数据流向。

- ① PROM config FPGA with mcs file
- ② JTAG config FPGA with bit file.
- ③ VME write bit file into flash by using CPLD, then CPLD read bit file to config FPGA.

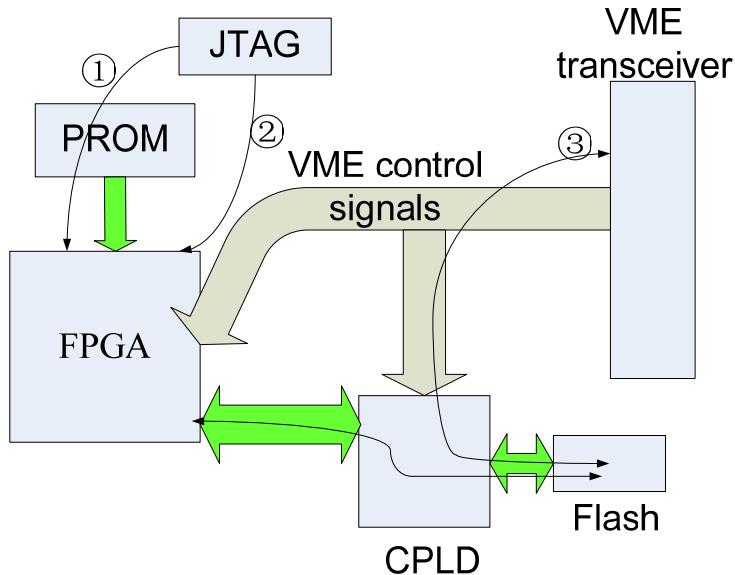


图5.1 FPGA的三种配置方式

(1) JTAG 配置方式

JTAG 是 FPGA 最普通的配置方案，在调试初期非常有用，可以快速的更新 FPGA 的固件程序。JTAG 方式不仅可以为 FPGA 下载比特流文件，还可以给 CPLD 下载文件。

但是通过 JTAG 给 FPGA 下载程序的方式，等到硬件断电时，FPGA 内部的程序就丢失，所以每次上电都需要重新下载，比较麻烦。

(2) PROM 配置方式

PROM 也是 FPGA 的一种基本配置方式，在调试初期，只需要通过 JTAG 方式给 PROM 下载一次程序，就可以把 FPGA 的代码保存在 PROM 里面。这样上电时，FPGA 会自动加载程序，并且开始运行。这样可以保持一段时间不用反复下载 FPGA 程序，为初期的调试工作带来很大便利。

但是 PROM 同样需要 JTAG 线进行下载，这在实验厅进行取数时，是不可能的。因为在现场取数时，需要操作员远程控制所有电子学和控制系统，不会因为需要更新 FPGA 程序而反复插拔硬件设备，这不仅不安全，也很不方便。

所以应该设计逻辑更加复杂的、使用更加简便的 FPGA 配置方式，能够通过

VME 总线完成 FPGA 的程序更新。

(3) 使用 CPLD 和 FLASH 的在线配置方式

CPLD 和 FLASH 的配合使用，可以实现 FPGA 的在线配置方式。这种配置方法的流程如下：

第一步，CPLD 内部的非易失性存储单元已经通过 JTAG 下载方式保存好了 CPLD 的程序，这样，当硬件上电时，CPLD 可以正常开始工作。

第二步，CPLD 作为 FLASH 和 VME 的总线接口部分，上位机可以通过 VME 总线把 FLASH 擦除一遍，然后再把 FPGA 的程序以比特流的方式写入到 FLASH 里面。为了安全起见，会再次把 FLASH 内部写好的文件读取出来，同上位机通过 VME 总线指定的比特流文件进行比较，以确保 FLASH 被正确的写入合适的程序。

第三步，CPLD 再把 FLASH 的程序烧写到 FPGA 里面。这样 FPGA 就能够以新的程序开始工作了。

图 5.2 显示了上述更新程序的流程。

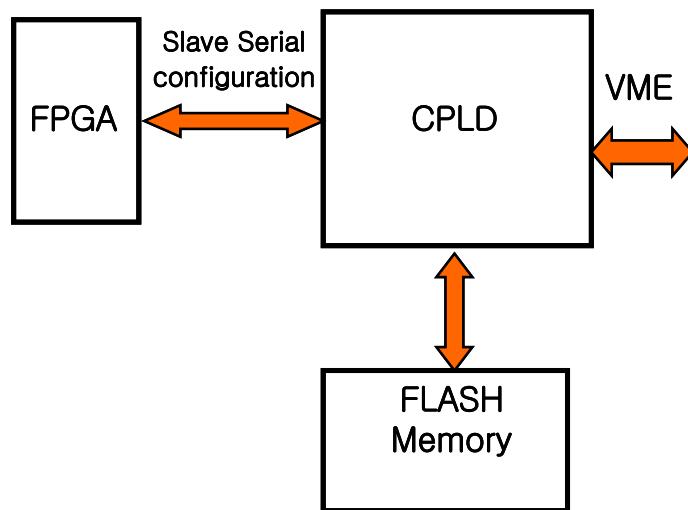


图 5.2 FPGA 在线配置电路

5.2.2 VME 总线

VME (Versa Module Euro card) 总线是一种标准的总线结构，因为其性能稳定可靠，数据传输速度快，数据传输方式多样，广泛应用于军事、航天、基础科学研究等多个领域^[43]。

在大亚湾反应堆中微子实验中，对 VME 总线的使用主要体现在以下几个方面：

(1) 单字读写

单字读写方式非常简便，在下载 FPGA 程序，配置 FPGA 工作状态，检查 VME 机箱内部所有模块的工作状态等方面很容易实现。图 5.3 是 VME 单字读写方式的

时序图。

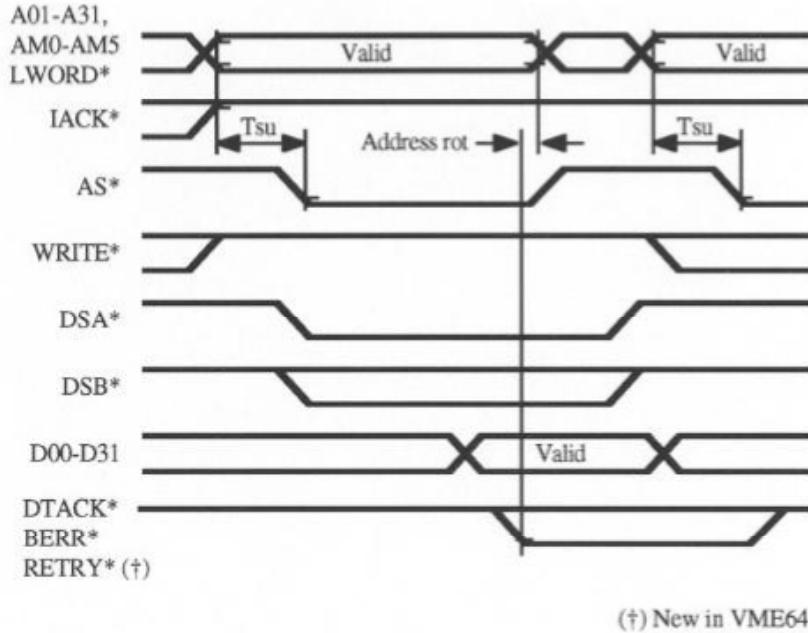


图5.3 单字读写

但是单字读写方式传输速率低，占用内存多，所以不适合大规模的数据传输。尤其是对于大亚湾的数据传输量来说，单字读写方式是无法完成的。

所以单字读写方式适合一些简单的小规模数据传输，在调试、配置、监控等方面效果明显。

(2) CBLT 读写

CBLT (Chained BLock Transfer)，就是菊花链传输方式。它通过 VME 机箱内部多个模块之间传递令牌，来逐个读取模块中的数据。这种方式对于大亚湾反应堆中微子实验来说非常适用，只需要一次启动，就能读取多个模块的数据。

(3) 背板信号交互

背板的信号交互指 VME 机箱内局部触发模块和前端电子学的信息约定。例如前端电子学需要传送缓存区状态信息给局部触发板。只有当前端电子学和局部触发模块的缓存区没有填满的情况下，局部触发模块才能产生触发信号存储至缓存区，否则就会丢失触发信号。

另外，局部触发板需要提供触发源读出方式信息给前端电子学。局部触发信号反映的是子探测器内部的信号情况，前端电子学只需要将缓存区内 $1\mu s$ 的数据传递给数据获取系统，而交互触发信号反映的是多个子探测器之间的信号情况，前端电子学则需要将缓存区内 $200\mu s$ 的信息读取出去。这种不同读取数据方式也是通过 VME 背板的信号交互完成的。

5.2.3 时钟电路

在实验正式运行时，主触发板使用时钟系统提供的时钟进行工作。在调试初期，主触发板需要为自己提供工作时钟。

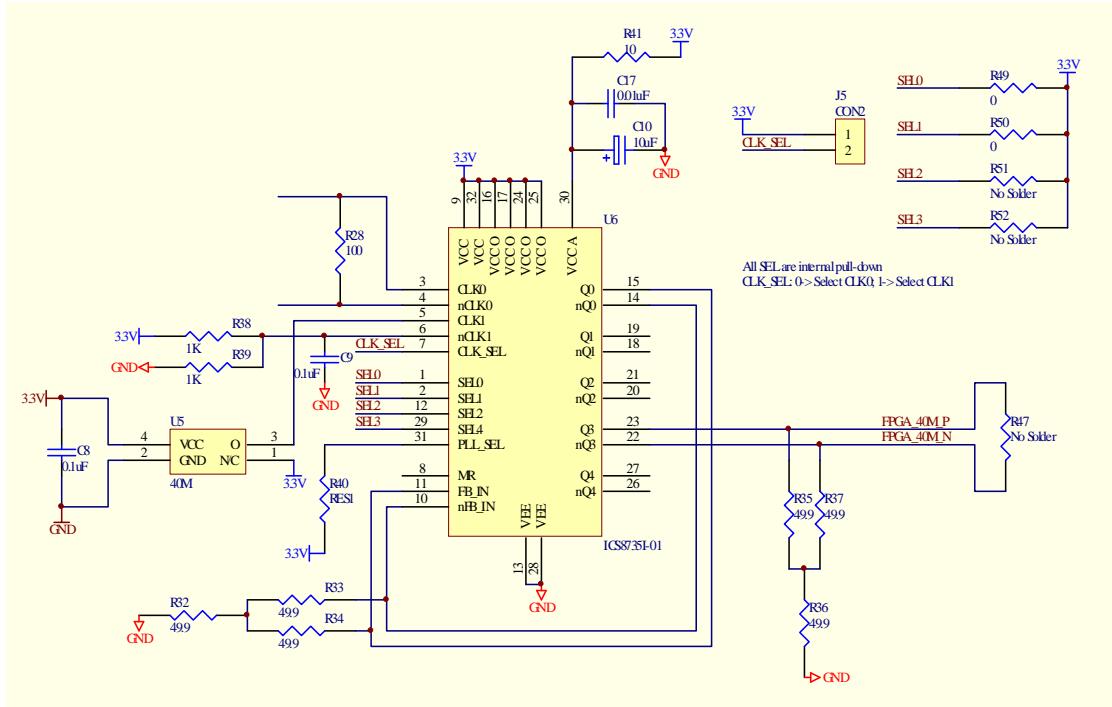


图 5.4 主触发模块的时钟电路

图 5.4 是主触发模块的时钟电路，采用 ICS8735I-01 芯片实现时钟锁存和选择。在这个电路中，时钟有两个来源：CLK0 是时钟系统提供的时钟，CLK1 是主触发板的晶振提供的时钟。经过锁存后，时钟锁存芯片提供 40MHz 时钟给 FPGA。在 FPGA 内部，再将时钟倍频为 160MHz 时钟作为 FPGA 的工作主时钟。

5.2.4 数字信号输入输出电路

在主触发板里，数字信号的输入输出电路分别采用图 5.5 和图 5.6 所示电路。

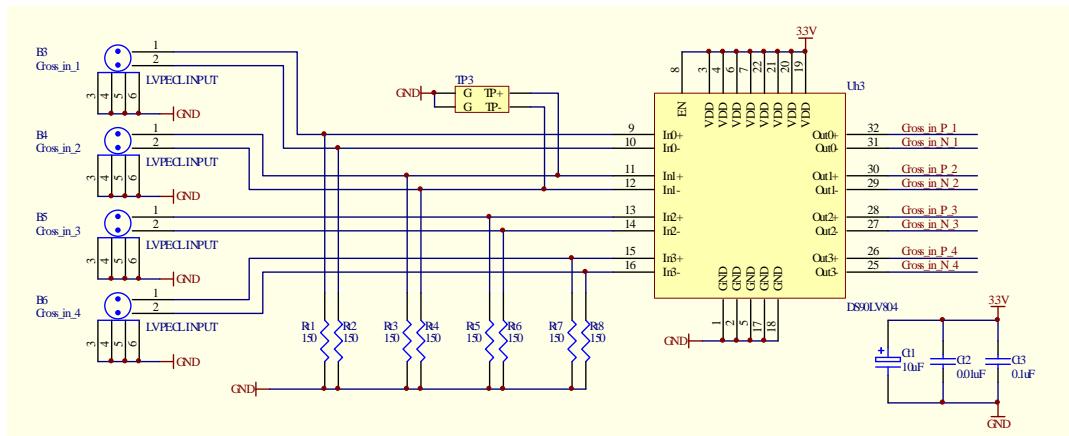


图5.5 数字信号输入电路

数字信号输入电路采用 DS90LV804 芯片,这是一个四通道的 LVDS 输入电路。

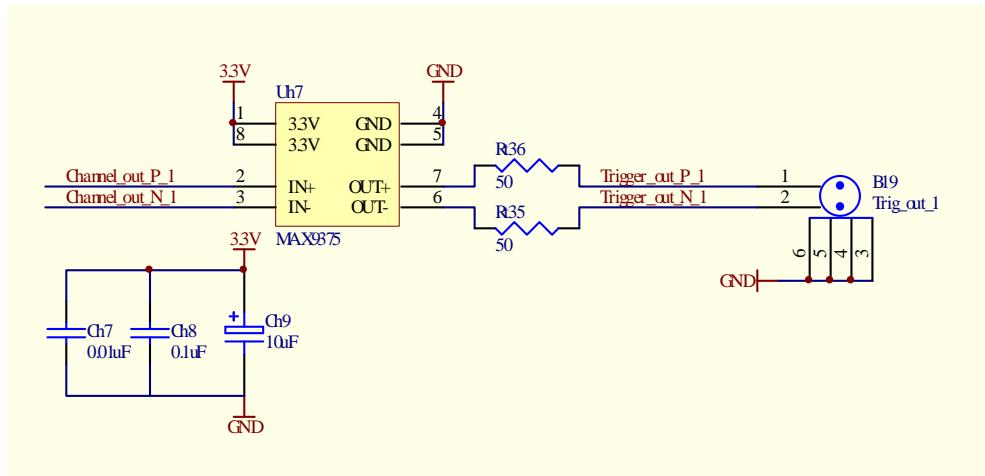


图5.6 数字信号输出电路

数字信号输出电路采用 MAX9375，这是一个单通道的 LVDS 转 LVPECL 信号电路。

5. 2. 5 实物图

图 5.7 是主触发模块的硬件实物图，目前已经生产测试完成 4 块，并交付实验现场使用。

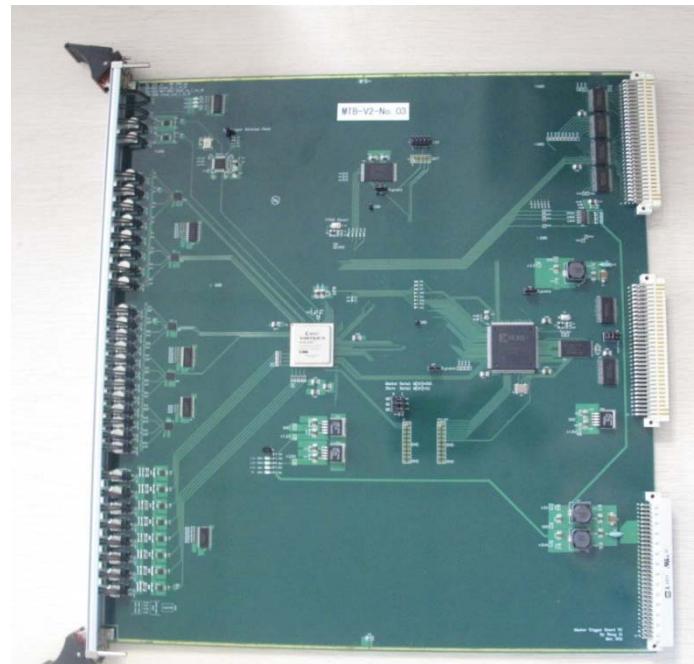


图5.7 主触发模块硬件

5.3 局部触发模块硬件

局部触发模块的硬件如图所示，主要包括 VME 总线电路、FPGA 及其配置电路、CPLD 和 FLASH 电路、模拟信号整形处理电路、数字差分信号传输电路、以及时钟电路组成^[45]。

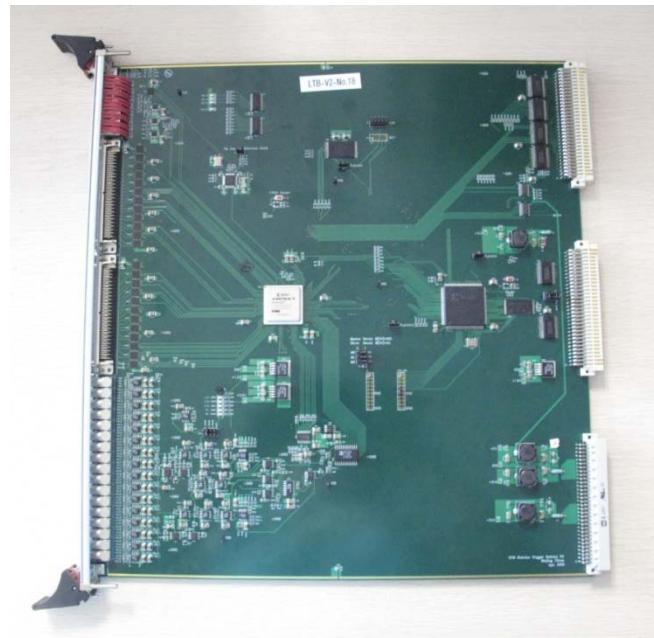


图5.8 局部触发模块硬件

5.4 大亚湾反应堆中微子实验现场安装情况

目前，19 块局部触发板和 4 块主触发板已经全部生产测试完成，安装至大亚湾反应堆中微子实验现场。图 5.9 是大亚湾实验近点的电子学间。

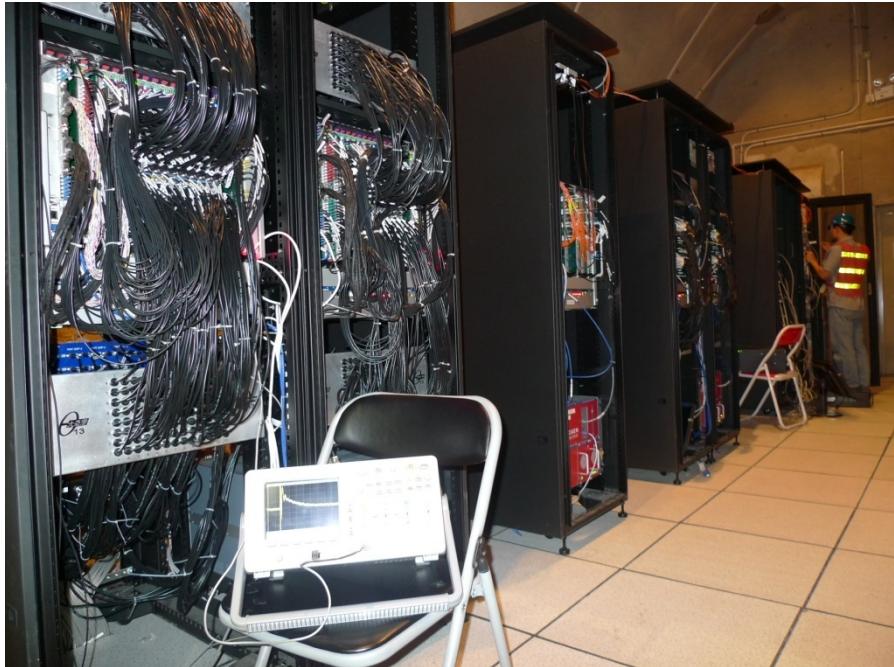


图 5.9 大亚湾实验厅的电子学间

图 5.9 中从左至右的六个 VME 机柜分别是：两个反电子中微子探测器、阻性板室探测器和时钟系统、两个水契伦科夫探测器、刻度系统和数据获取系统。

其中，局部触发板安装在两个反电子中微子探测器机柜和两个水契伦科夫探测器机柜中，主触发板安装在阻性板室探测器的机柜中。

5.5 小结

本章介绍了详细介绍了触发系统的硬件设计，主要介绍了主触发模块的硬件电路。目前已经按照大亚湾反应堆中微子实验的要求，生产并测试了 19 块局部触发模块和 4 块主触发模块。

经过电子学联合调试，实验所需的所有触发系统模块已经安装到大亚湾反应堆中微子实验现场。

第 6 章 触发测试系统

6.1 触发测试系统的作用

为了保证所有 19 块局部触发模块的同一性和电子学联合调试期间快速查找问题, 本论文设计并搭建了测试平台, 包括触发测试模块(Trigger Test Board, 即 TTB)和上位机测试软件。

该测试平台可以和局部触发模块连接起来, 产生局部触发模块所需要的所有信号: 包括 Nhit 信号, Esum 信号, 时间和时钟信号; 并提供测试程序, 完成对局部触发模块的功能测试; 另外还设计一键式检测方法, 在确保硬件正确的情况下, 快速的、全面的检测局部触发板的触发性能。

6.2 触发测试模块的逻辑

触发测试系统提供局部触发模块所需要的所有信号, 代替与局部触发模块连接的所有周边系统, 从而测试局部触发模块的基本功能和性能。在批量生产局部触发模块时, 触发测试系统能够方便的测试局部触发模块。在现场联合调试期间, 当局部触发模块出现问题时, 测试系统能够快速的检查问题根源, 以便尽快维修。

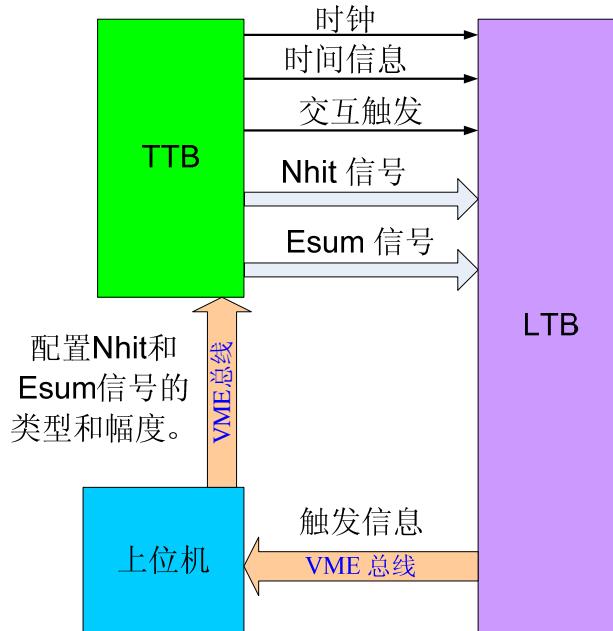


图 6.1 触发测试模块和局部触发模块的连接示意图

从图 6.1 中可以看出, 触发测试模块提供 Nhit 信号、Esum 信号、交互触发信

号、时钟和时间信息给局部触发模块。上位机配置触发测试模块产生不同信号传递给局部触发模块，并且从局部触发模块获得触发信息，从而测试局部触发模块的触发性能。

为了全面的测试局部触发单板触发效率，触发测试模块提供 Nhit 和 Esum 信号有多种形式，如图 6.2 所示。

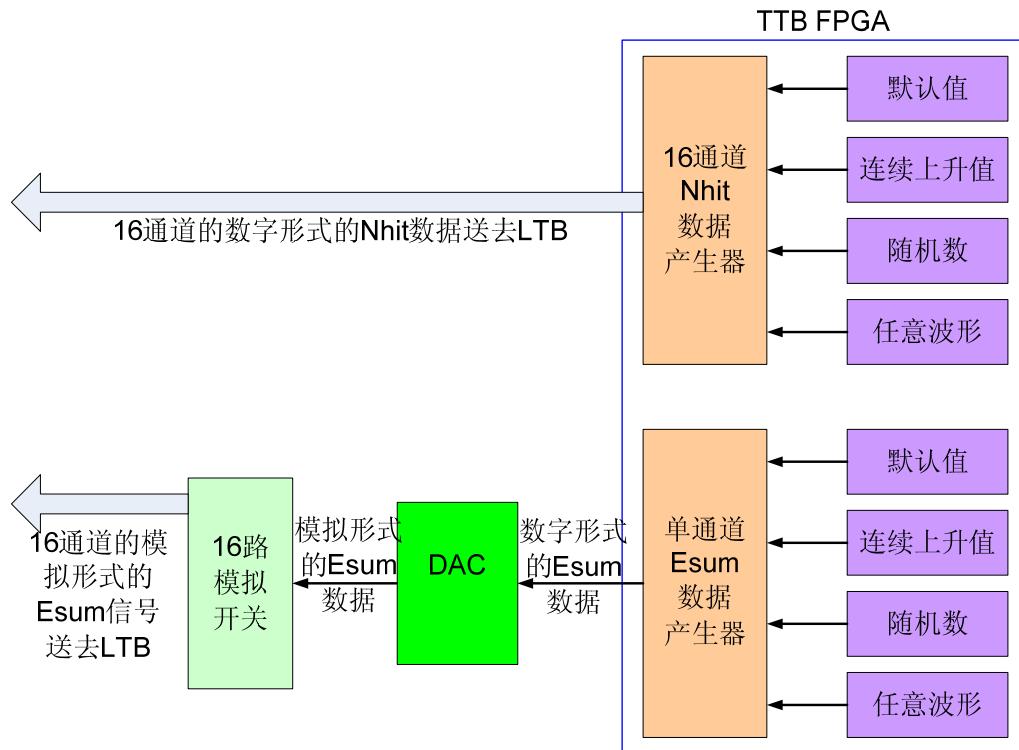


图 6.2 触发测试模块的逻辑。

从图 6.2 中可以看出，TTB 以 80MHz SDR 方式产生四种 Nhit 信号：固定值，连续上升值，随机值和存储值。这些不同种类的信号各有用处。

- (1) 固定值就是 Nhit 信号幅度不变，用它可以测试局部触发模块 Nhit 触发的精确度和传输信号对齐情况。
- (2) 连续上升值可以用来检测局部触发模块的硬件连通性。
- (3) 随机值可以模仿本底，检查局部触发模块的触发响应速度。
- (4) 存储值就是把任意波形的数据存到触发测试模块的存储器里，可以检查局部触发模块对不同信号的触发效率。这种任意波形可以尽量模仿 PMT 的信号，从而检测局部触发模块对真实信号的响应。

与 Nhit 类似，触发测试模块以 160MHz 的速度产生四种 Esum 数字信号，然后再通过数模转换芯片，把数字信号转换成模拟信号，再传递给局部触发模块。

这四种数字信号与 Nhit 信号类似，功能也相同，唯一不同的是用于产生存储

值的存储器更大一些，为了描述更加精细的光电倍增管信号，包括过冲和振荡。

6.3 触发测试软件

触发测试软件主要包括：

- (1) 局部触发模块、主触发模块和触发测试模块基本功能的测试软件。
- (2) 为了快速检测局部触发模块，设计一键式测试方式。

当局部触发模块的硬件完成后，一键式测试方式可以快速的检查局部触发模块全部功能和触发效率，并且记录触发信息，不需要人为监管，自动完成。根据记录的触发信息，绘制局部触发模块单板触发效率曲线，检查局部触发模块的模拟噪声和多块板子的同一性。

(3) 在线更新所有触发模块 FPGA 程序的软件。更新程序软件为给现场实验人员提供简洁的操作界面，如图 6.3 所示。

```

-bash-2.05b# ./upgrade
*****
*          Upgrade MENU
*          C code version: 2009/10/26-23:06
*****
*  L : upgrade LTB FPGA
*  T : upgrade TTB FPGA
*  M : upgrade MTB FPGA
*  Q : Quit
*  ? : show this manual
*****
1
Please type in the name of LTB FPGA bit file:
ltb_fpga_top_20100408.bit
Erasing flash...
Flash is erased successfully
Programing progress [100%]
Flash is programed!
Verifying flash...
Verifying progress [100%]
Flash is programed successfully!
Configuring FPGA...
FPGA is configured successfully!

```

图6.3 在线更新触发模块程序界面

6.4 触发测试硬件

触发测试模块的硬件设计难点在于：为局部触发模块提供快速变化的 Esum 信号。这要求传递给数模转换芯片的数字信号和同步时钟要固定的相位差，才能正确的、快速的把数字信号转换成模拟信号。

6.4.1 特点

测试模块的模拟电路包括数模转换电路和模拟信号开关电路。

(1) 数模转换电路用于把设定好的数字波形转换成模拟波形, 采用 AD9726, 16 位 400MSPS 传输速率。在触发测试模块中采用 320MHz 作为数据传输时钟, 160MHz 作为数模转换芯片的工作时钟。使用 FPGA 内部的带相位调整功能的数字时钟管理模块 (Digital Clock Manager, 即 DCM) 调整工作时钟和数据传输时钟的相位关系, 确保数模转换芯片能够正确转换模拟信号。图 6.4 是数模转换电路。

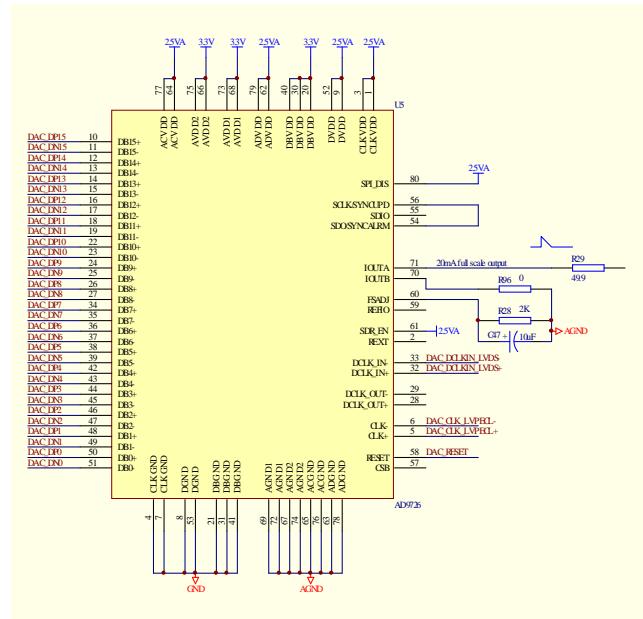


图 6.4 触发测试模块的数模转换电路

(2) 模拟开关电路

用于打开或者关闭模拟信号, 这样能够确切知道触发测试模块送出了多少个波形信号, 从而计算局部触发模块的触发效率。

为了消除耦合噪声, 选用了单刀双掷开关, 如果关闭模拟信号, 就把开关接到地上 (GND)。这样就不会有任何小信号耦合过去, 对测试精度造成影响。图 6.5 是模拟开关电路。

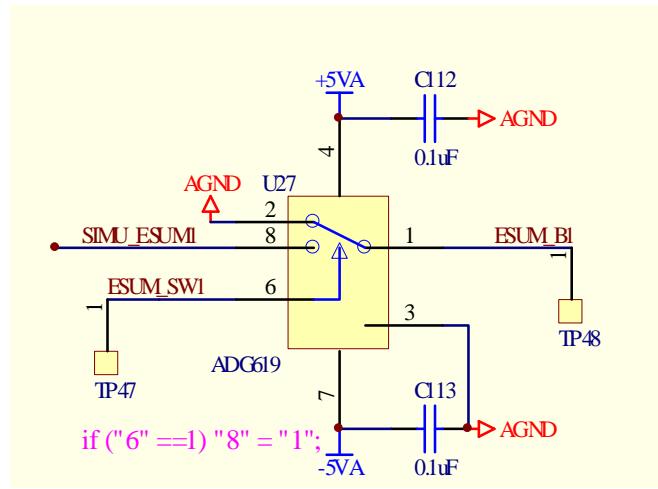


图6.5 模拟开关电路

(3) 外部输入模拟信号

另外，触发测试模块还可以选择外部输入的模拟信号，然后再把该模拟信号传给局部触发模块的16个通道。这种方式是通过信号发生器产生模拟信号送入触发测试模块，然后再转发给局部触发模块。图6.6是模拟信号选择电路。

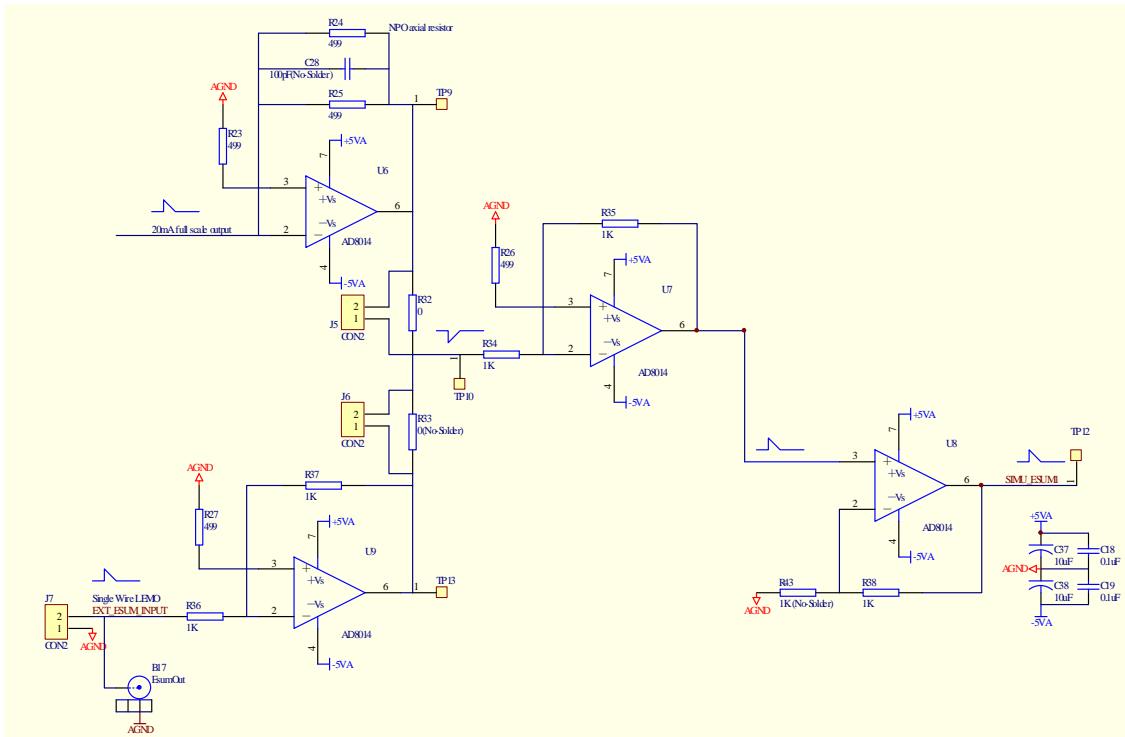


图6.6 模拟信号选择电路

利用外部的模拟信号的测试方式需要人为调整信号幅度，不能自动完成，不能用于局部触发模块的一键式测试方式。但是信号发生器产生的信号比一般的数

模转换芯片产生的模拟信号质量好, 变化更多, 一些较窄的脉冲信号能够通过信号发生器实现。所以在测试特别快速信号时, 可以采用这种方法。

6.4.2 实物图

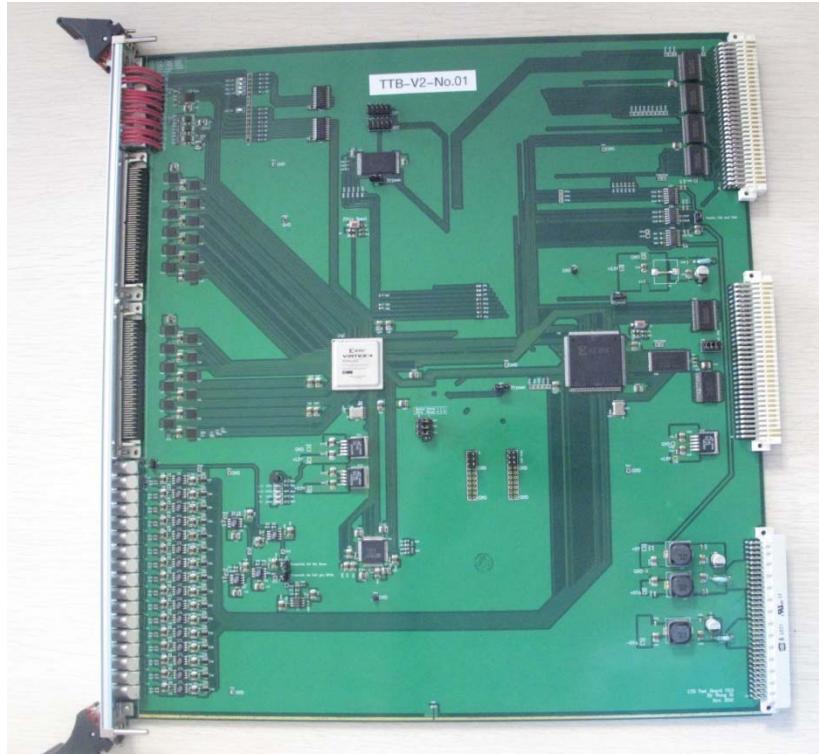


图6.7 触发测试模块硬件

本论文制作了 1 块测试触发模块, 已经调试结束, 并且与局部触发模块搭建测试平台, 完成了 19 块局部触发模块的性能测试工作。

6.5 局部触发模块的测试方案

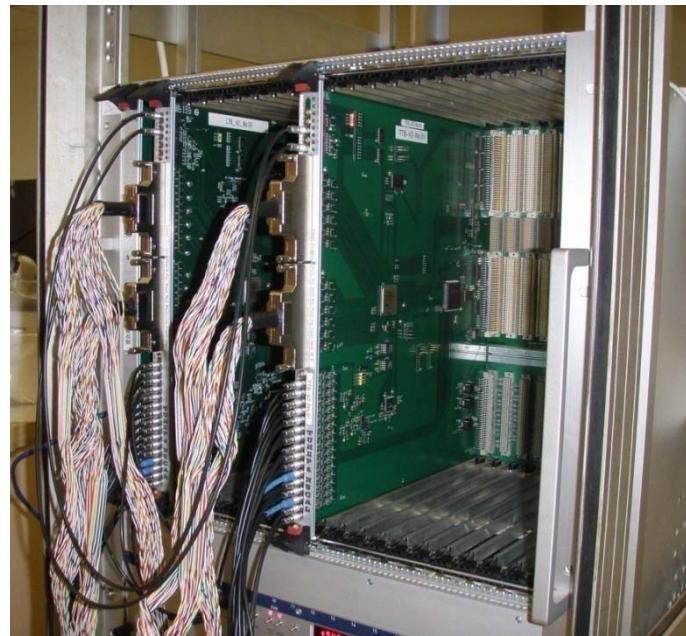


图6.8 实验室测试方案连接图

图 6.8 是在实验室内对局部触发模块进行测试的连接图。左侧是局部触发板，右侧是触发测试板。中间两条 100pin 的彩色双绞线传输的是 Nhit 信号，最下面 16 个 LEMO 线传输的是 Esum 信号。

6.6 小结

本章详解介绍了触发测试系统的设计方案和实现方法。触发测试系统为测试局部触发模块提供了便利的条件，不仅能够在前期调试阶段快速的测试局部触发模块，而且为后期维护运行提供方便的检查和测试手段。

第 7 章 触发系统的性能分析

触发效率是触发系统性能的重要指标，它反应了触发系统按照设定的阈值，正确挑选事例的能力。对于中微子实验来说，因为事例率较低，每一个反电子中微子探测器在近点是 960 个/天，远点是 90 个/天，所以要求触发系统不能漏掉触发信号，即在符合触发条件的事例发生时，触发系统要正确给出触发信号。

然而，分析触发效率会跟多个方面的因素相关，比如探测器性能、刻度源稳定性等等。所以可以从简单到复杂，从单板触发效率到整体触发系统的触发效率进行逐步的研究。

电子学的死时间跟多种因素相关，数据获取系统的传输速率，触发系统的逻辑设计方案等。所以在设计触发系统方案时，需要采用能够减少死时间的逻辑算法，而且要能够标记死时间以便离线数据分析测量死时间。

7.1 触发效率

分析触发系统的触发效率可以按照以下几个步骤来实现：

(1) 分别测量局部触发模块和主触发模块的单板触发效率，即首先分析硬件设计对触发效率的影响。

(2) 然后使用刻度源分析触发系统绝对效率。刻度源可以给出固定能量或者固定能谱的信号，即输入触发系统的信号特性是固定并且可知的。然后按照设定的阈值，数据获取系统会根据触发系统产生的触发信号读取数据，通过分析这些数据可以查看触发系统输出情况，就可以得出绝对触发效率。

(3) 在探测器进行中微子事例探测时，是不能放置刻度源的。而且在长时间取数时，需要经常监测触发性能是否发生变化，所以需要测量相对触发效率。它与绝对触发效率的区别就是不能明确得知输入信号的特性。

(4) 因为探测器的结构特点，触发逻辑方案等诸多因素，中微子事例发生在探测器的不同位置时， N_{hit} 和 E_{sum} 的触发效率是不尽相同的，所以需要研究 N_{hit} 和 E_{sum} 触发方式的区别，为改进触发逻辑提供依据。

7.1.1 单板触发效率

大亚湾反应堆中微子实验需要 19 个局部触发模块和 4 个主触发模块，在制作硬件时，不同的元器件会有一些微小的差别，可能会给硬件提供不同程度的噪声，需要测试这些噪声，只要这些噪声在实验要求的最小阈值以下就可以使用。

为了减少系统误差，在把触发系统在交付现场使用之前，需要测量单板的触发效率，以确保稳定性和可靠性。

(1) 局部触发模块的单板触发效率

利用测试系统来测试局部触发模块的单板触发效率。

首先由测试触发模块产生固定幅度和数目的 Nhit 信号送给局部触发模块，为局部触发模块设定一个阈值，并且产生触发信号，比较触发信号的个数和送入信号的个数，就得到触发效率。

然后调整阈值，绘制一条固定幅度，不同阈值的触发效率曲线，检查在整个阈值范围内，局部触发模块的触发效率稳定性。

最后调整信号幅度，按照上面的做法，绘制多条触发效率曲线，检查局部触发模块对不同的信号幅度的触发效率稳定性。

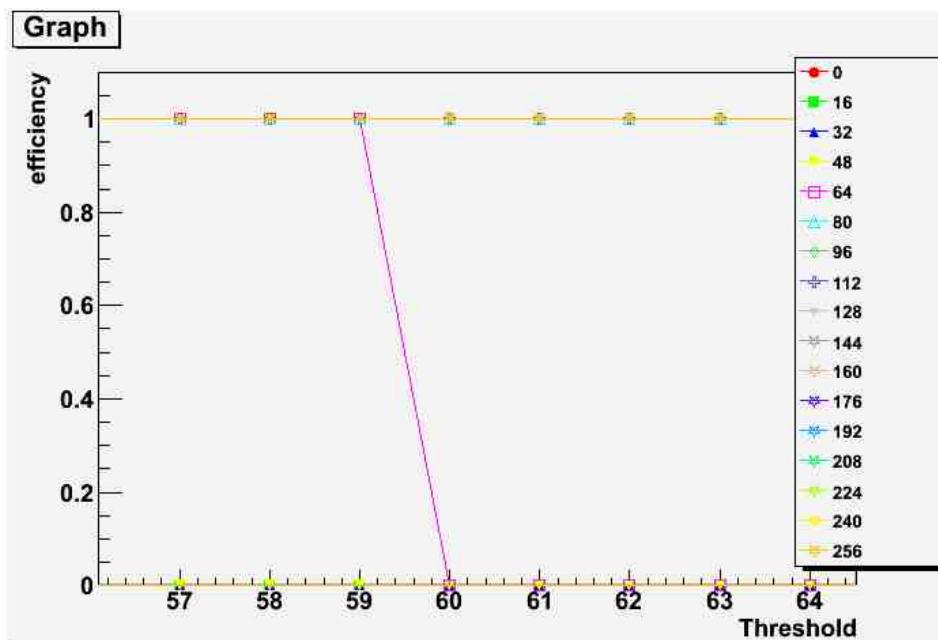


图 7.1 局部触发模块的一条 Nhit 触发效率曲线

图 7.1 是局部触发模块的一条 Nhit 触发效率曲线。横坐标是阈值，纵坐标是触发效率。因为 Nhit 是数字信号，所以当阈值大于信号幅度时，触发效率就为 0。当阈值小于信号幅度时，触发效率就会从 0 跳到 1。

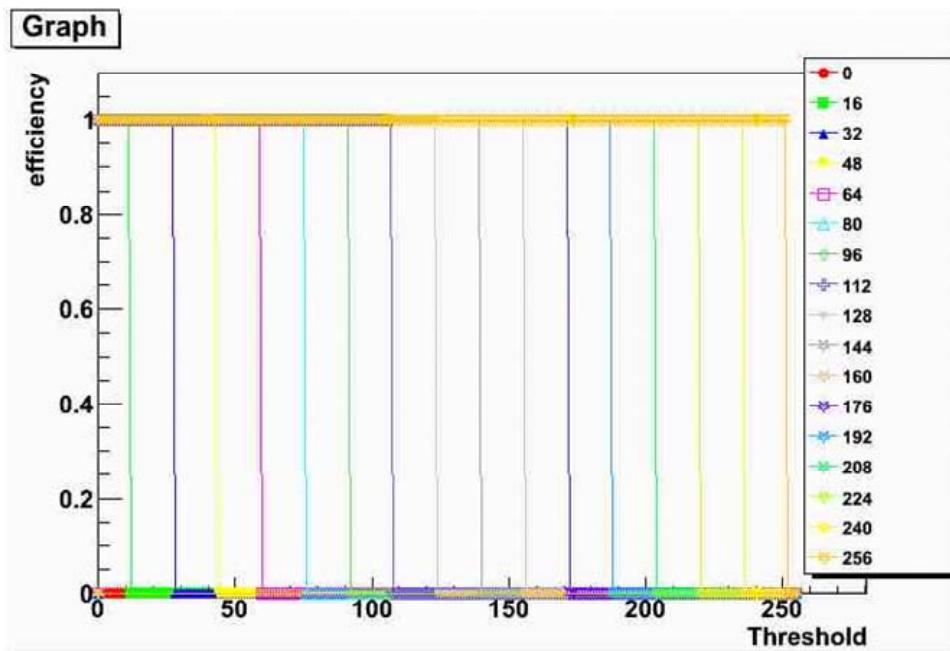


图 7.2 局部触发模块的多条 Nhit 触发效率曲线

图 7.2 是局部触发模块的多条 Nhit 触发效率曲线。可以看出，在整个阈值范围内和信号幅度范围内，当信号幅度超过阈值时，局部触发模块的单板 Nhit 触发效率是 100%。

测量局部触发模块的 Esum 触发效率方法和 Nhit 一样，不同的是送入局部触发模块的信号是模拟信号，进入局部触发模块后，会进行整形处理。即便是相同的信号的幅度、不同的信号宽度经过整形处理之后得到的信号幅度也会有微小的差别。而且阈值比较器芯片会在信号幅度和阈值接近的时候，产生的比较结果会有一些毛刺。

所以阈值小于信号幅度时，并且比较接近，Esum 的触发并不会像 Nhit 那样立即跳至 1，而是会有一定几率产生触发信号。随着阈值不断变小，这个几率逐渐增大。即出现了图 7.3 中的“爬坡过程”。但是，当阈值小于信号幅度一段距离之后，触发效率就会一直保持在 1 的位置。即一旦触发效率“爬”到 1，就不会再掉下来。

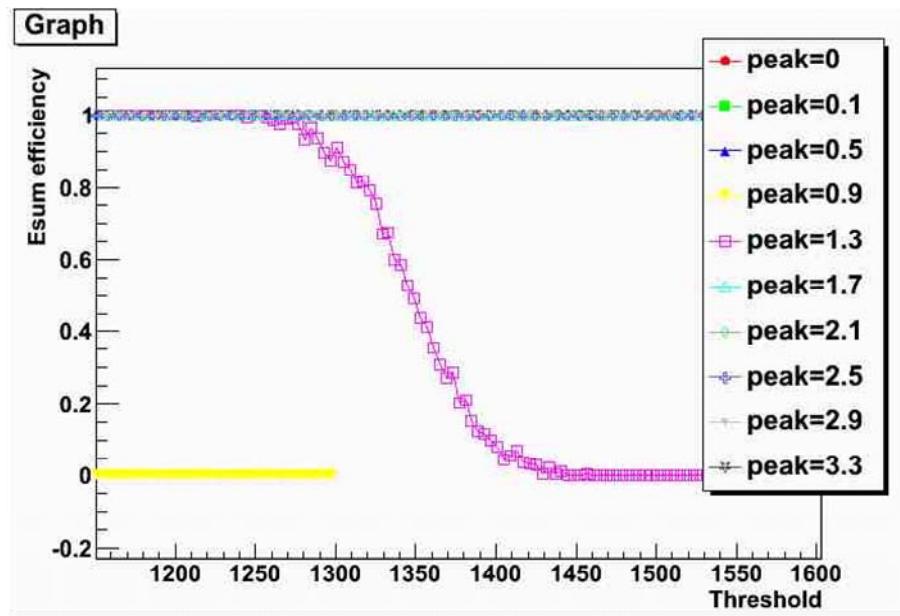


图 7.3 局部触发模块的一条 Esum 触发效率曲线

图 7.4 是局部触发模块的多条 Esum 触发效率曲线。从图中可以看出，在整个阈值范围内和信号幅度范围内，当信号幅度超过阈值时一段距离后，局部触发模块的单板 Esum 触发效率是 100%。

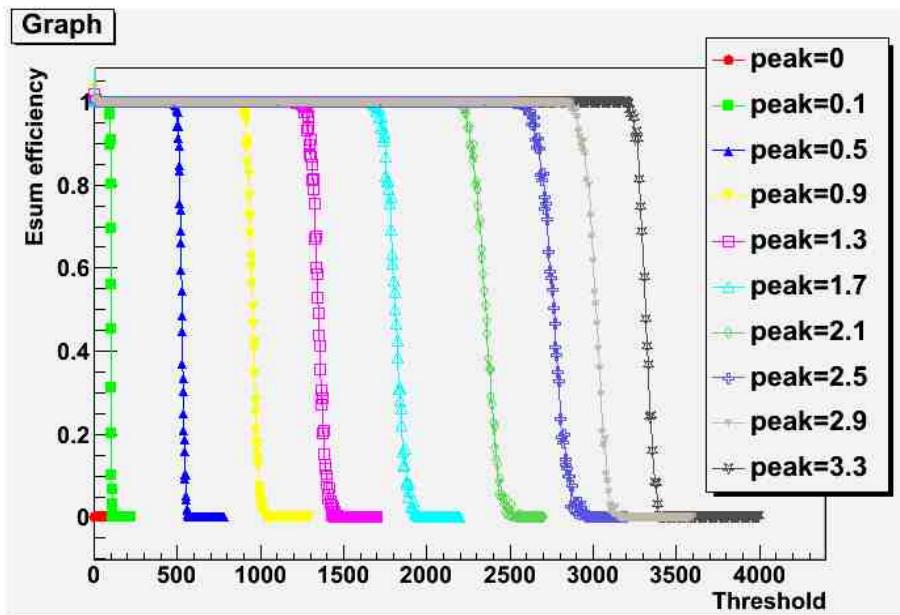


图 7.4 局部触发模块的多条 Esum 触发效率曲线

另外，因为 Esum 是模拟信号，在波形整形过程中，会有一些小的噪声，如图 7.5，这些噪声会导致，阈值非常低时，效率超过 1，只要噪声不超过实验要求的最小阈值就是允许的。

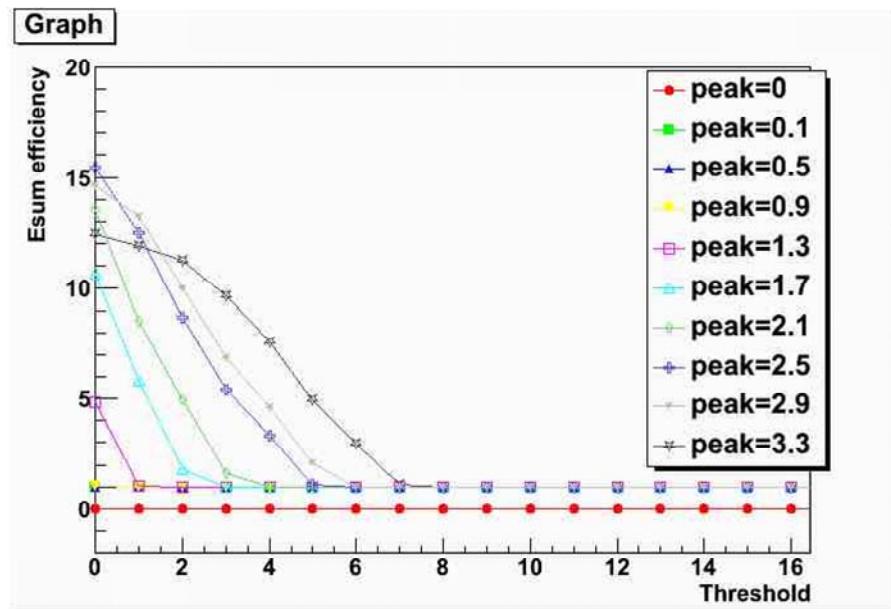


图7.5 局部触发模块的Esum触发噪声

从图7.5可以看出,当阈值大于8时,触发效率就为1了。换算成电压值就是大约6mV,换算成能量就是大约0.5MeV,符合设计要求。而且根据目前运行情况,再次调整了Esum触发方式的增益,使得噪声大约小于0.3MeV。

(2) 主触发模块的单板触发效率

主触发模块的单板触发效率需要按照不同逻辑来测试。因为主触发模块需要从多个探测器的局部触发模块获得交互触发请求信号,所以一些复杂逻辑需要在实验现场进行测试。

1、或逻辑测试

局部触发模块产生固定个数的交互触发请求送给主触发模块,经过主触发模块或逻辑产生交互触发信号送还给局部触发模块,局部触发模块再用它产生局部触发信号。统计数据流向中所有触发信号的个数,可以得出主触发模块的单板触发效率。图7.6就是按照上述的测试方案,利用测试软件监测整个数据传输链上每一个位置的触发信号个数,可以看出所有的数目都是相同的,说明主触发模块的或逻辑触发模式的触发效率是100%。

LTB_RAW_CROSS_TRIGGER_NUM_REG_ADDR	:	38255
LTB_VALID_CROSS_TRIGGER_NUM_REG_ADDR	:	38255
MTB_CROSS_TRIG_RAW_COUNT4_REG_ADDR	:	38255
MTB_CROSS_TRIG_ARBITRATION_COUNT_REG_ADDR	:	38255
MTB_VALID_TRIG_COUNT_REG_ADDR	:	38255
MTB_ENCODED_TRIG_COUNT_REG_ADDR	:	38255
MTB_BROADCAST_TRIG_COUNT_REG_ADDR	:	38255
MTB_CROSS_TRIG_LTB_COUNT_REG_ADDR	:	38255
LTB_CROSS_TRG_IN_COUNT_REG_ADDR	:	38255
LTB_RAW_LOCAL_TRIGGER_NUM_REG_ADDR	:	38255
LTB_VALID_LOCAL_TRIGGER_NUM_REG_ADDR	:	38255

图 7.6 主触发模块的或逻辑触发效率

2、反符合逻辑测试

在实验现场利用多个 VME 机箱，用 WP 探测器去反符合 AD 探测器的信号。调整不同探测器产生的周期触发信号到达主触发模块的延迟，让 AD 的信号落在反符合窗口内，通过检查局部触发的事例率来计算触发效率。

表 7.1 主触发模块的反符合触发效率

AD2 交互触发请求频率	WPI 交互触发请求频率	AD2 局部触发信号读出频率
2kHz	2kHz	没有触发信号
2kHz	1kHz	1kHz

从表中可以看出，当 WPI 送出的交互触发请求为 1kHz 时，AD2 的交互触发请求就会因为反符合逻辑而去掉 1kHz。这说明主触发模块的反符合逻辑触发模式的触发效率是 100%。

3、回看逻辑测试

用信号发生器产生三路模拟信号，其中两路信号同步，把这三路信号送进前端电子学。触发系统使用局部触发模块的 Nhit 三阈值触发和主触发模块的回看触发逻辑。两路同步的信号会被局部触发模块判断为大信号，另一路信号会被判断为小信号。通过调整大信号和小信号之间的时间延迟，检查主触发模块发出的回看触发事例率，来获得触发效率。

表 7.2 主触发模块的回看逻辑触发效率

小信号延迟时间	大信号延迟时间	回看逻辑类型	AD2 局部触发信号读出频率
5 μ s	0 μ s	1	没有触发信号
5 μ s	0 μ s	2	500Hz
0 μ s	5 μ s	1	500Hz
0 μ s	5 μ s	2	没有触发信号

表 7.2 的测试条件是: 信号发生器送三路幅度为-10mV~100mV, 宽度为 100ns, 频率为 500Hz 的脉冲信号进入前端电子学。其中两路信号为同步信号。AD2 的局部触发模块使用 Nhit 三阈值触发方式, 低阈值设置为 0, 高阈值设置为 1。这样两路的同步信号就会被判断为大信号, 另外一路信号就会被判断为小信号。固定大小信号的延迟, 检查 AD2 由获得的交互触发信号产生的局部触发事例率。从测试结果可以看出, 主触发模块的回看逻辑触发模式的触发效率是 100%。

4、刻度触发逻辑测试

刻度系统送出刻度触发请求信号给主触发模块, 主触发模块再广播给局部触发模块。通过对比刻度系统产生的触发和局部触发模块由刻度触发得到的局部触发数量, 可以获得触发效率。

表 7.3 主触发模块的刻度触发效率

刻度系统送给主触发模块的刻度触发频率	AD2 局部触发信号读出频率
100Hz	95Hz

表 7.3 的测试条件是: 刻度系统送刻度触发请求信号给主触发模块, 并且刻度源释放光信号由 PMT 采集, 经过前端电子学和局部触发系统产生局部触发信号。比较这两个事例率, 就可以得出主触发模块的刻度触发效率。

经证实, 其中缺少的 5Hz 事例率不是由主触发模块造成的, 而是由刻度系统造成的, 因为目前的刻度系统有一个暂时无法克服的缺点, 即刻度系统发出刻度信号时, 刻度源并没有发出光信号。刻度源的这一缺点对后续的绝对触发效率测量也有影响。但是这一缺点并不会造成错误的判断, 因为可以通过离线数据分析将刻度源没有发光的信号的事例挑选出来。去掉刻度系统的因素, 主触发模块的刻度触发逻辑的触发效率是 100%。

通过以上四类测试, 可以得知主触发模块的触发效率是 100%。

7.1.2 绝对触发效率

在大亚湾反应堆中微子实验安装和运行初期，要对每一个探测器的进行能量刻度，就需要用到刻度系统。

刻度系统由 LED 发光源的控制部分和刻度信号产生部分组成。刻度系统可以控制加在 LED 两端的电压值，从而控制了 LED 的发光强度。刻度系统每控制 LED 发一次光，就同时传送刻度信号给触发系统。触发系统可以通过 PMT 和前段电子学获得 LED 的发光信息，产生 Nhit 或者 Esum 触发，并且通过主触发模块获得刻度触发信号，将这两类触发信号都打包到数据包里。

然后经过离线分析，获取每一个触发信号产生时 PMT 获得的能量值。把其中一些能量极小的触发信号去掉。因为这些能量极小的触发信号都由于刻度系统的 LED 不发光，却送出了刻度信号造成的。

最后用 Nhit 触发信号个数除以刻度触发信号个数，得到的就是触发系统的绝对触发效率。

图 7.7 是上述流程的示意图。

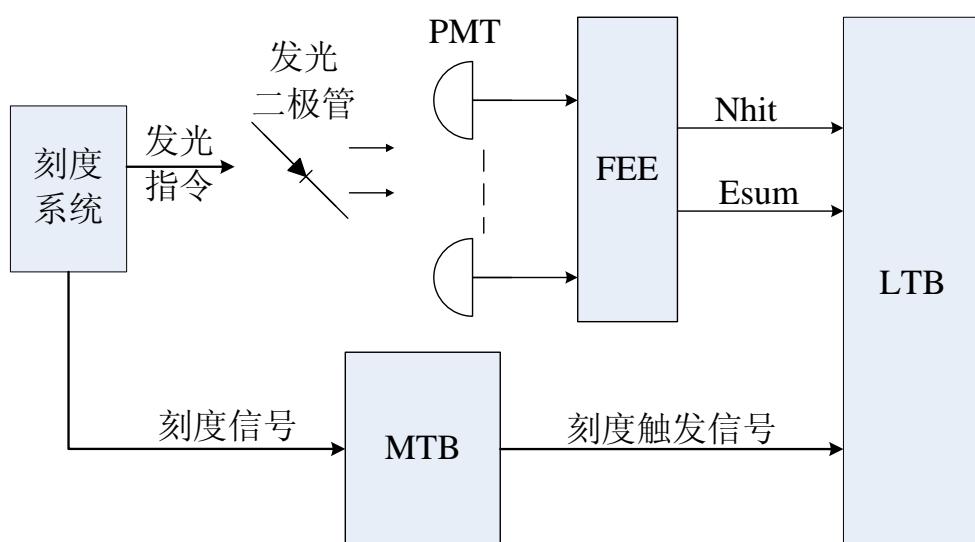


图 7.7 LED 做发光源的刻度系统示意图

按照这样的测试方法计算出的触发效率如图 7.8 所示，可以看出 Nhit 的触发效率是 100%。

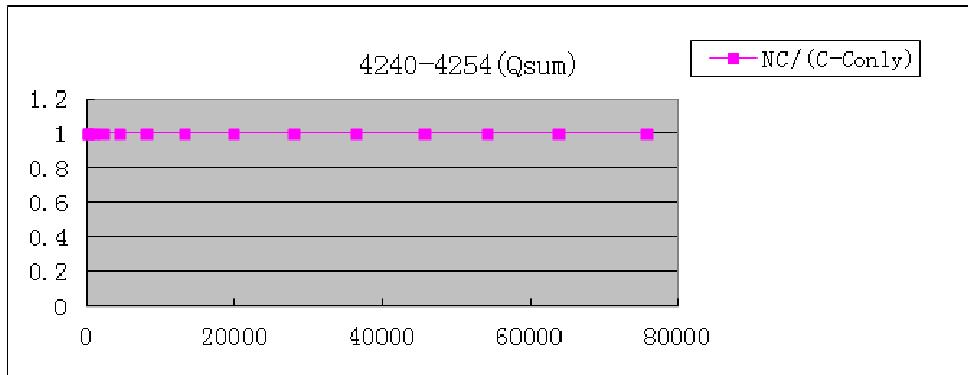


图 7.8 不同 LED 发光能量下的 Nhit 触发效率

上图 7.8 的横坐标是由 Nhit 触发信号的所记录的 PMT 能量和, 以单光电子的能量做单位, 纵坐标是触发效率。每一个点都是用一次运行的数据测得的触发效率值, 在一次运行过程中, 加在 LED 两端的电压不变, 即 LED 的发光强度不变。

Nhit 的绝对触发效率如公式 7-1 所示。

$$\eta = \frac{NC}{C - Conly} \quad (7-1)$$

其中, 分母是去掉刻度系统的刻度信号数目减去 LED 不发光的事例数目, 即输入到触发系统的信号个数。分子是触发信号里既有 Nhit 触发又有刻度触发的个数, 即触发系统产生的触发信号数目。最终的比值就是触发系统的 Nhit 绝对触发效率。

图 7.9 是 Esum 绝对触发效率, 可以看出触发效率也接近 100%, 但是对于较高能量的信号, 触发效率下降。

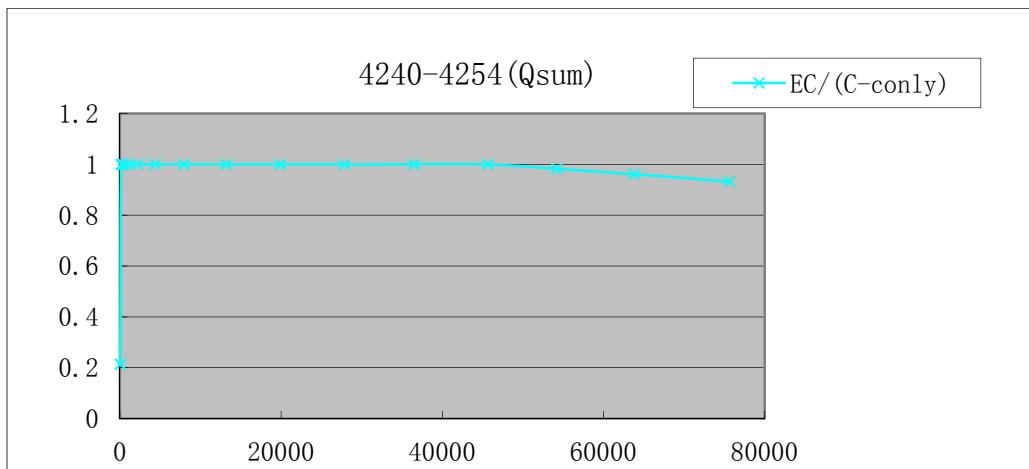


图 7.9 不同 LED 发光能量下的 Esum 触发效率

导致下降有两点: 一是过大的 LED 信号回给 PMT 带来很多高幅度的过冲,

而 Esum 产生触发是要求信号低于阈值，再高于阈值时才能产生新的触发。大信号的过冲太久，以至于下一个发光信号已经到来，所以丢失了当前的触发信息，导致触发效率在高能量处效率降低。

在大亚湾反应堆中微子实验中，经过前端电子学和触发系统处理之后的信号不会有那么高的能量。另外，目前对局部触发模块的 Esum 电路的增益做了调整，阈值范围会在更小的区域发挥作用，这对于降低探测阈值是很有帮助的。

另外还有一种刻度源就是放射源 Co60，测量方法是把放射源放在探测器内部，触发系统通过 Nhit 或者 Esum 触发方式产生触发信号，数据获取系统获得数据，采集较长的一段时间，以确保有足够的样本。然后经由离线分析采集到的数据能谱与蒙卡模拟的能谱进行比对。

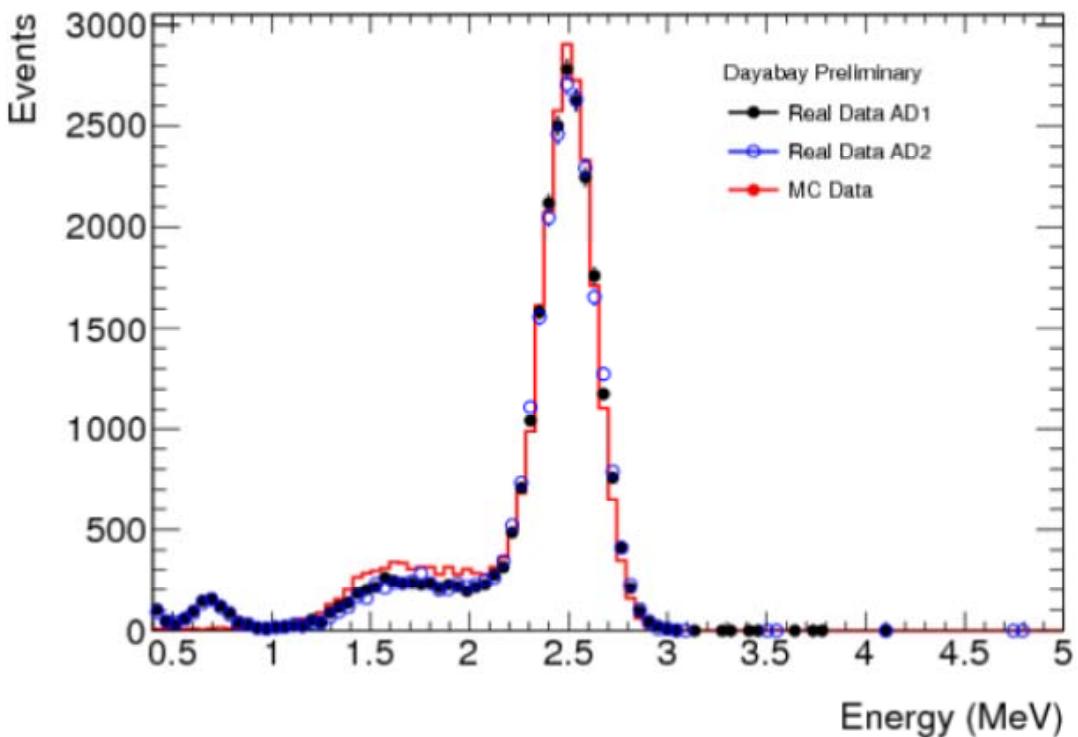


图 7.10 Co60 能谱比对

图 7.10 横坐标是信号能量，纵坐标是事例数，统计相同能量的事例个数，绘制成能谱图。这是两个不同探测器的能谱与蒙卡模拟比对的结果，可以看出，符合的很好。此图由中国科学院高能物理研究所 soeren 提供。

7.1.3 相对触发效率

然而在实验运行取数期间，不能在探测器内部放置放射源。而且实验运行一段时间后，也需要随时监测探测器及其电子学的性能是否稳定，所以需要使用另

外的方法来测量触发效率。

测量的方法是，首先用很低的阈值采集一段时间数据。如果阈值太低，数据量就会明显增大，对于数据获取系统来说，会造成数据拥堵。所以要选择不会影响数据获取系统读取数据的最低阈值作为本底的采样阈值。这样获得的数据可以近似的认为是天然本底，也就是输入触发系统的信号。

然后提高阈值，再采集同样时间长度的一段数据，把它作为触发系统的输出信号。在两段数据中，寻找能量相等事例的数据，比值就是相对触发效率。

$$\eta = \frac{N_{thrd=t, enery=x}}{N_{thrd=15, enery=x}} \quad (7-2)$$

按照上述公式，可以绘制一条阈值为 t 时的相对触发效率曲线。然后调整阈值，绘制多条相对触发效率曲线。

按照这样的方法，利用 dry run 数据分析了相对触发效率，如图 7.11 所示：

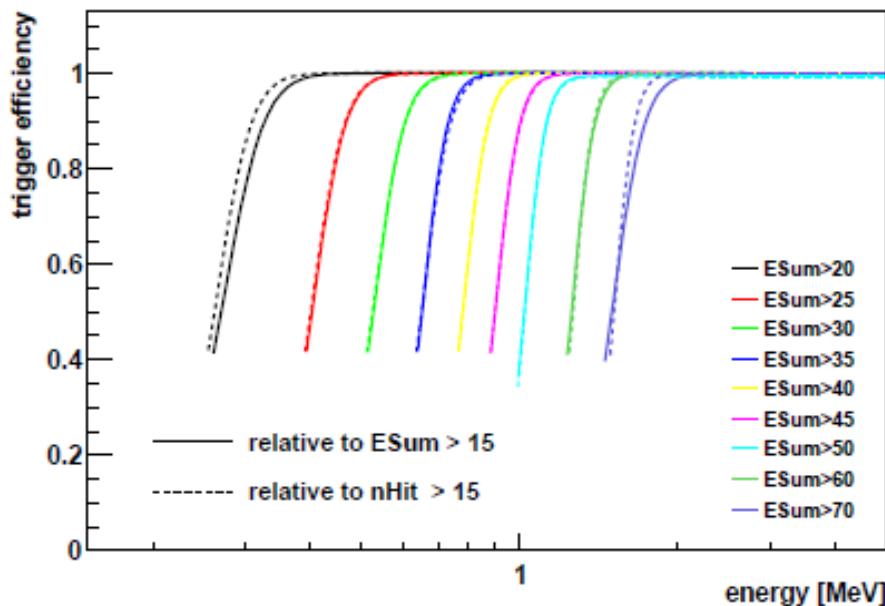


图 7.11 相对触发效率

图 7.11 的横坐标是信号的能量，纵坐标是相对触发效率。从图中可以看出触发效率曲线急速攀升，并且达到 100%。此图由中国科学院高能物理研究所 soeren 提供。

7.1.4 与顶点相关的触发效率

因为 Nhit 和 Esum 产生触发信号的原理不同，这两者在取数时会各有特色相互补充。

Nhit 的优点是触发效率没有“爬坡”过程。所以在接近阈值附近的位置，触发效率高，能够确保不会漏掉触发。

Esum 的优点是在探测器内部的位置，触发效率均匀，即在探测器边角的位置和探测器正中间的位置，触发效率是一致的。从图 7.12 可以看出这一特性。

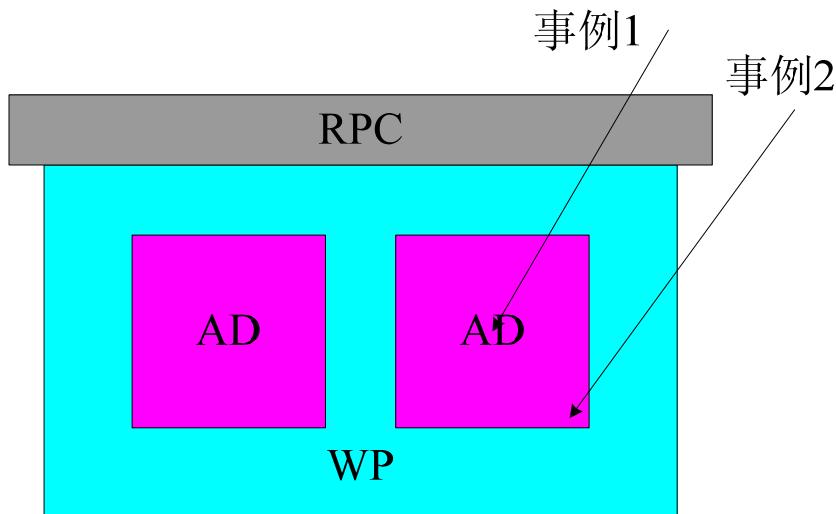


图 7.12 事例发生位置示意图

当能量相同事例 1 和事例 2 分别发生在探测器的中心和边角位置，因为能量相同，Esum 触发方式收集到的能量和是一样的。

但是事例 1 发生在中心位置，几乎所有的 PMT 都能收集到光子信号，即被击中，则 Nhit 数目就比较高。而事例 2 发生在边角位置，PMT 数量少，只有紧邻的几个 PMT 能够收集到光子信号，远处的 PMT 就不能收集到光子信号了，即 PMT 的被击中数目比较低。

在这种情况下，事例 1 和事例 2 都能产生 Esum 触发信号，但是事例 2 就不一定能产生 Nhit 触发信号了，而事例 1 却能产生 Nhit 触发信号。相比之下，对于同样能量的事例来说，中心位置的 Nhit 效率比较高，而边缘位置的效率比较低。图 7.13 和图 7.14 就反映了这种情况。

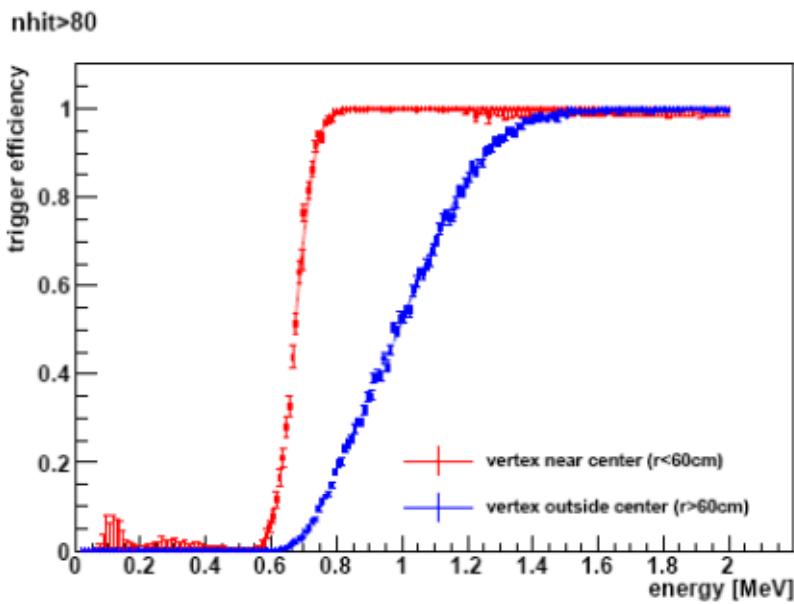


图 7.13 Nhit 触发和事例顶点的关系

图 7.13 显示的是 Nhit 触发效率与顶点的关系，红色线表示事例重建后的顶点位置与探测器的中心位置小于 60cm，蓝色线表示事例重建后的顶点位置与探测器的中心位置大于 60cm。横坐标是信号能量，纵坐标是触发效率。从图中可以看出，Nhit 触发效率在靠近探测器中心位置时较好，在探测器边角位置就不太好了。此图由中国科学院高能物理研究所 soeren 提供。

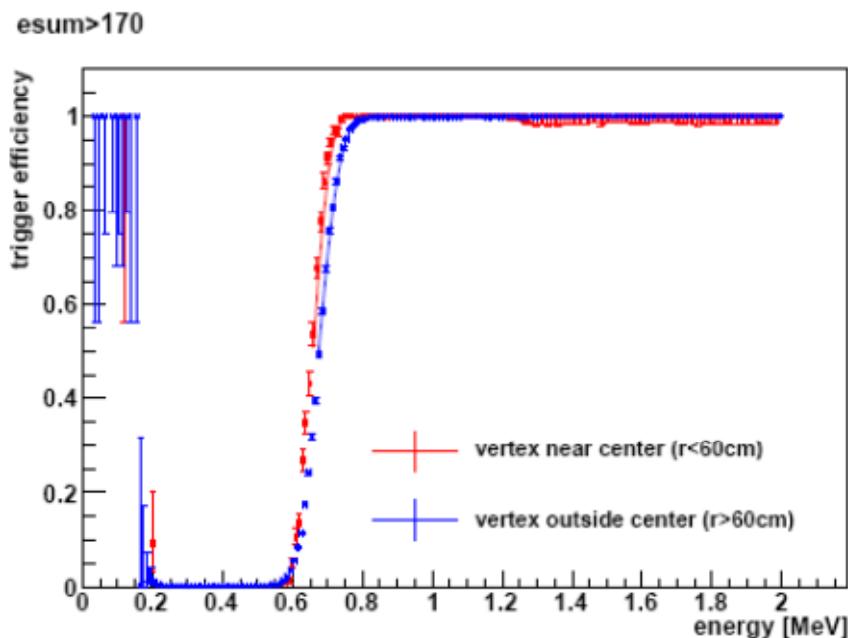


图 7.14 Esum 触发和事例顶点的关系

图 7.14 是 Esum 触发效率与顶点的关系，红色线表示事例重建后的顶点位置与探测器的中心位置小于 60cm，蓝色线表示事例重建后的顶点位置与探测器的中心位置大于 60cm。横坐标是信号能量，纵坐标是触发效率。从图中可以看出，Esum 的触发效率与事例的顶点无关。此图由中国科学院高能物理研究所 soeren 提供。

经过以上多种触发效率的计算方法看出，设计 Nhit 和 Esum 的“或”逻辑触发方式能够显著的提高效率。

所以经过 dry run 和实际运行取数一段时间后，更新了触发系统的触发逻辑，为 Nhit 和 Esum 都分别设计三阈值触发方式，这样 Nhit 和 Esum 的触发方法完全对称，可以在一些特殊情况下相互弥补，提高触发效率。

7.2 触发死时间

死时间是评估触发系统性能的另一项重要指标。死时间的主要来源是因为事例率太高，把局部触发模块和前端电子学的缓存区填满，这时候如果产生了新的触发信号，因为数据获取系统来不及读出，又没有空间存放，所以被丢掉了。这段时间就成为死时间，即触发信号无法被读出的时间称为死时间。

电子学允许有死时间，但是需要能够测量死时间，所以在局部触发模块里面添加了统计逻辑，即当缓存区满，触发信号无法读出时，统计被丢掉的触发信号个数。通过这数据可以估算出死时间。

7.2.1 局部触发模块的死时间

测量局部触发模块的死时间有两种方法：

第一种是使用周期触发信号，不断提高周期触发信号频率，监测数据获取系统的拥堵情况。当拥堵时，统计到的触发信号个数，乘以周期，就是死时间。

第二种是使用随机时间间隔的触发信号，监测数据拥堵情况。

在实际测试中，情况比较复杂，因为数据获取系统读取的数据长度是与信号的大小相关的。如果信号较大，前端电子学的数据量就会显著增多，因为有很多 PMT 都有数据需要存储和读出，这时数据多，死时间就长。

所以为了测试局部触发模块的死时间，在测试中只有局部触发模块和数据获取系统。测试数据获取系统在数据长度相同情况下，承受周期触发信号和随机时间间隔的触发信号冲击的能力。

当平均周期相同的情况下，随机时间间隔的信号对数据获取冲击力比周期触发信号强。经过测试，随机时间间隔的触发信号的在不造成事例拥堵的情况下，最高事例率约是 150kHz，而周期触发信号的最高事例率约是 300kHz。

电子学整体设计的数据读出要求是 2kHz，局部触发模块远远满足这一要求。

7.2.2 主触发模块的死时间

主触发模块的死时间与编码相关，因为主触发模块的数据不能通过 VME 总线读取出去，所以只能通过串行编码的方式把交互触发信息传递给局部触发模块，由局部触发模块把交互触发信息打包。在编码的时间里，如果有新的交互触发请求到达主触发模块，就会被丢掉。所以编码是主触发模块的主要死时间来源。为了降低这个死时间，主触发模块的工作频率提高为 160MHz，死时间小于 300ns，触发系统的方案是要求小于 500ns。

7.3 小结

本章从多个角度详细分析了触发系统的触发效率和死时间。充分说明了触发系统所设计的所有逻辑稳定的、可靠的。而且这些逻辑不仅能在实际物理取数时显著提高触发效率，还能够在测试初期提供诸多便利和帮助。

随着调试运行的不断深入，添加的触发方式逐渐显现功效。这一点也说明触发逻辑不是一成不变的，而且能够在之前的基础上不断完善和更新的。

第 8 章 总结与展望

中微子物理是近代物理研究的热点之一。其中，中微子振荡现象的发现、中微子振荡理论的不断发展引发了世界物理学家对中微子的极大关注。描述中微子振荡现象的振荡矩阵包含六个参数，经过多个国家的物理学家们的不懈努力，目前还有两个半参数没有得到精确测量。世界上有多个国家参与到中微子振荡参数 θ_{13} 的测量实验中：法国的 Double CHOOZ 反应堆中微子实验、日本的 Super Kamiokande、韩国的 RENO，日本的 T2K 加速器中微子实验、美国的 MINOS 加速器中微子实验，还有中国的大亚湾反应堆中微子实验。

8.1 主要成果与创新

大亚湾反应堆中微子实验是以中国为主导的大型基础科学实验国际合作项目，目标是通过探测大亚湾核电站反应堆群产生的反电子中微子，在 95% 的置信度下，使得实验测量中微子振荡参数 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的灵敏度达到 0.01 或更好。

本论文根据大亚湾反应堆中微子实验的精度要求，设计并研究了触发系统。为了提高触发效率和分析探测器性能，分别为 Nhit（击中数）和 Esum（能量和）这两种互相补充的触发逻辑添加了三阈值触发模式，进一步完善了局部触发逻辑。

本论文还设计了主触发模块电子学，并且根据中微子的探测反应过程，设计了或逻辑交互触发、反符合交互触发、回看交互触发以及刻度触发模式，这些触发模式与物理含义密切相关，不仅通过事例标记为离线数据分析提供便利，而且对在线数据筛选方面起了重要作用。

本文设计并搭建了独立的触发系统测试平台。利用该平台的模拟数据、大亚湾现场实验所采集的刻度数据，以及中微子反应和本底数据，对触发系统的硬件与固件进行了触发效率研究，结果表明目前的触发系统达到了设计要求。

目前，触发系统已经在大亚湾反应堆中微子实验现场安装完毕，并且在 2011 年 8 月，大亚湾反应堆中微子实验的近点实验厅观测到中微子事例。

8.2 后续工作展望

触发系统的硬件和逻辑设计已经全部完成，需要进一步详细分析其性能，通过统计数据，精确测得触发效率。

随着大亚湾反应堆中微子实验的不断推进，需要保障触发系统安全稳定运行。

当全部实验厅正式取数，需要经常检查触发系统的工作状态。

参考文献

- [1] The Super-Kamiokande Collaboration. Constraints on neutrino oscillation parameters from the measurement of day-night solar neutrino fluxes at Super-Kamiokande. *Phys. Rev. Lett.* 82: 1810-1814, 1999
- [2] The SNO Collaboration Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in Sudbury Neutrino Observatory, *Phys. Rev. Lett.* volume 89, No. 1, 011301 (2002)
- [3] The SNO Collaboration. Measurement of Day and Night Neutrino Energy Spectra at SNO and Constraints on Neutrino Mixing Parameters *Phys. Rev. Lett.* volume 89, No. 1, 011302 (2002)
- [4] The KamLAND Collaboration. A study of extraterrestrial antineutrino source with the KamLAND detector. *arXiv:1105.3516*
- [5] The KamLAND Collaboration. Constraints on θ_{13} from A Three-Flavor Oscillation Analysis of Reactor Antineutrinos at KamLAND. *Phys.Rev.D83:052002*, 2011
- [6] Yifang Wang , Measuring $\sin^2 2\theta_{13}$ with the Daya Bay Nuclear Reactors *arXiv: hep-ex/0610024*
- [7] The Double Chooz Collaboration, Double Chooz, A Search for the Neutrino Mixing Angle theta-13, *arXiv:hep-ex/0606025*
- [8] Dario Motta , Search for the θ_{13} Neutrino Mixing Angle Using Reactor Anti-Neutrinos, *arXiv:hep-ex/0702003*
- [9] RENO Collaboration. RENO: An Experiment for Neutrino Oscillation Parameter theta_13 Using Reactor Neutrinos at Yonggwang. *arXiv:1003.1391*
- [10] Daya Bay Collaboration. A Precision Measurement of the Neutrino Mixing Angle theta_13 using Reactor Antineutrinos at Daya Bay. *arXiv:hep-ex/0701029*
- [11] Daniel M. Kaplan, The Double Chooz Experiment. *arXiv:hep-ex/0608040*
- [12] C. Palomares (for Double-Chooz Collaboration). Double Chooz neutrino experiment *arXiv: 0911.3227*
- [13] CHOOZ Collaboration. Search for neutrino oscillations on a long base-line at the CHOOZ nuclear power station, *Eur. Phys. J. C27* (2003) 331. *arXiv: hep-ex/0301017*
- [14] T2K Collaboration Indication of electron neutrino appearance from an accelerator-produced off-axis Muon neutrino beam. *Phys.Rev.Lett.107:041801*, 2011. *arXiv:1106.2822*
- [15] Francesca Di Lodovico (for the T2K Collaboration), T2K Results and Future Plans. *arXiv:1110.5382*
- [16] MINOS Collaboration. Active to sterile neutrino mixing limits from neutral-current interactions

in MINOS. arXiv: hep-ex/1104.3922

[17] 王贻芳. 大亚湾反应堆中微子实验[J]. 中国基础科学. 2007(01)

[18] Particle data group, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 33, 1 (2006)

[19] D.H. Perkins, Introduction to High Energy Physics.北京: 世界图书出版公司, 2003

[20] M.D. Messier, Review of Neutrino Oscillations Experiments. arXiv:hep-ex/0606013

[21] B, Kayser. Neutrino Mass, Mixing, And Flavor Change, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 33, 156 (2006)

[22] F. Boehm, P. Vogel. Physics of massive neutrinos. Cambridge University Press, Cambridge, P87 (1987)

[23] B. Pontecorvo. Mesonium and anti-mesonium. Phys. JETP 6: 429. 1957.

[24] B. Pontecorvo. Neutrino Experiments and the Problem of Conservation of Leptonic Charge. Sov. Phys. JETP 26: 984. 1968

[25] J.W.F. Valle. Neutrino physics overview. Journal of Physics: Conference Series 53: 473. arXiv:hep-ph/0608101.

[26] G.L. Fogli, E. Lisi, A. Marrone, and A. Palazzo, and A.M. Rotunno, 40th Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories, La Thuile, Aosta Valley, Italy, 5-12 March 2005. arXiv: hep-ph/0506307.

[27] Jun Cao. Reactor Neutrino Experiments. arXiv:0712.0897

[28] Zhe Wang. Daya Bay Neutrino Experiment: Goal, Progress and Schedule. arXiv:1109.3253

[29] White Paper Report on using nuclear reactors to search for a value of θ_{13} , [hep-ex/0402041].

[30] The last unknown neutrino mixing angle Theta(13) and the Daya Bay experiment, David Jaffe, Proceeding of CIPANP 2006, AIP Conf.Proc.870:555-559,2006

[31] 孙亚轩, 曹俊, 陆锦标, 马宇倩, 王贻芳, 杨长根. 反应堆中微子实验的基线优化. 高能物理与核物理. Vol.29, No.6, Jun. 2005

[32] 占亮. 大亚湾中心探测器模拟与物理灵敏度[博士学位论文]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2009.

[33] 丁雅韵. 大亚湾中微子式样掺钆液体闪烁体的研制[博士学位论文]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2008,

[34] 温良剑. 大亚湾中心探测器反射板研制及事例重建研究[博士学位论文]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2010.

[35] 王志民. 中微子探测器模型研究[博士学位论文]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2009.

[36] 陈伯伦. 中微子实验和振荡参数分析的若干研究[博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.

[37] 蒋文奇. 大亚湾中微子实验 PMT 读出电子学研究[博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术

大学, 2011.

[38] 季筱璐. 大亚湾中微子实验数据获取系统的研究与实现[博士学位论文]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2010.

[39] Qiu-ju Li, et al., Front-end electronic system of PMT readout for Daya Bay, in: IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2009, vol. N25-240.

[40] 薛涛, 龚光华, 陈少敏, 邵贝贝, 大亚湾反应堆中微子实验时钟时标广播系统的初步设计, 核电子学与探测技术, 2009, Vol.29 (No.6): p. 1253-1256.

[41] 宫辉. 大亚湾反应堆中微子实验的触发系统的研究与设计[博士后出站报告]. 北京: 清华大学, 2009

[42] 薛涛. 反电子中微子的反 β 衰变反应链实验的触发系统实现[博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2008.

[43] American National Standard for VME64 Extensions for Physics and Other Applications. ANSI/VITA 23-1998

[44] 大亚湾核电站反应堆群内的中微子已被发现. <http://luojaenergy.net/nuclear/nucr/2011-08-18/180.html>

[45] Hui Gong, Yanchang Lin, Guanghua Gong, Tao Xue, Xi Wang, Beibei Shao, Shaomin Chen, Xiaonan Li, Zheng Wang, Qiuju Li. Design of the local trigger board for the Daya Bay reactor neutrino experiment. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A. May 2011, Vol. 637 Issue 1

致 谢

衷心感谢导师邵贝贝教授对本人的耐心指导。

非常感谢工程物理系陈少敏教授和宫辉讲师对本人的精心指导。

感谢实验室龚光华副教授、薛涛讲师、曾鸣讲师、杜强讲师、邓智副教授和李荐民教授对本人的耐心指导，感谢实验室所有同学们对我的帮助。

衷心感谢中国科学院高能物理研究所的王贻芳、曹俊、杨长根、李小男、衡月昆、王铮、李秋菊、蒋文奇、李飞、季筱璐、叶梅、王志民、温良剑、何苗、soeren、陈晓辉、路浩奇、王玲玉、徐吉磊、关梦云等老师和同学们的帮助与指导。能够参与到这个合作组中，与这些富有激情、严谨、勤奋的科研工作者一同工作，是我莫大的荣幸。

特别感谢夫君代大海七年来的理解与支持，感谢那些携手走过的、幸福的、艰苦的岁月。

声 明

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

签 名： _____ 日 期： _____

个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

个人简历

1979 年 12 月 15 日出生于陕西省咸阳市。

1998 年 9 月考入国防科技大学电子科学与工程学院微波专业，2002 年 6 月本科毕业并获得工学学士学位。

2002 年 7 月在国防科技大学工作，曾经担任学员队干部，参谋，助教等职，现任讲师。

2006 年 9 月考入清华大学工程物理系核科学与技术专业，2008 年 7 月硕士毕业并获得工学硕士学位。

2008 年 9 月考入清华大学工程物理系核科学与技术专业攻读博士学位至今。

发表的学术论文

- [1] Wang Xi, Gong Hui, Lin Yan-chang, Gong Guanghua, Chen Shaomin, Shao Beibei,. The control and monitor interface of the local trigger board for the Daya Bay neutrino experiment, 10.1109/NSSMIC.2009 (Ei 收录, 检索号: 20101712880708)
- [2] 王玺, 邵贝贝. 完备地实现 C++ 多态性. 单片机与嵌入式系统应用. 2009.10
- [3] 王玺, 龚光华, 宫辉, 陈少敏, 薛涛, 邵贝贝. 大亚湾反应堆中微子实验触发系统的时钟检错功能. (已被核电子学与探测技术录用. 核心刊源)
- [4] X. Wang, H. Gong, G.H. Gong, T Xue, S.M Chen, B.B. Shao. Design of Test Trigger Board for the Daya Bay Neutrino Experiment (已被 IEEE NSS MIC 录用. EI 源刊)
- [5] Hui Gong, Yanchang Lin, Guanghua Gong, Tao Xue, Xi Wang, Beibei Shao, Shaomin Chen, Xiaonan Li, Zheng Wang, Qiuju Li. Design of the local trigger board for the Daya Bay reactor neutrino experiment. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A. May 2011, Vol. 637 Issue 1