



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

博士学位论文

大亚湾探测器控制系统设计与实现及惰性中微子研究

作者姓名: 张书华

指导教师: 王贻芳 研究员

中国科学院高能物理研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 粒子物理与原子核物理

研究所: 中国科学院高能物理研究所

2014年 4月

**Design and Implementation of the Daya Bay Detector
Control System and Study of Sterile Neutrino**

By

[Shuhua Zhang]

A Dissertation/Thesis Submitted to

The University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Doctor of Particle physics and nuclear physics

[Institute of High Energy Physics]

April, 2014

研究生学位论文声明

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

签名_____日期_____

关于学位论文使用授权的说明

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

签名_____日期_____

摘要

中微子从被预测到发现，由于很难被探测到，以及对标准模型的挑战，成为粒子物理学中最活跃的研究领域之一。在发现中微子振荡后，人们认识到中微子具有质量和味混合的性质。中微子混合规律六个参数之一的 θ_{13} 的值，对宇宙起源、粒子物理大统一理论、以及未来中微子物理的发展方向等有极为重要的意义。大亚湾中微子实验合作组在考虑事例率加谱形的分析后，得到了关于 θ_{13} 值的最新研究成果，即 $\sin^2(2\theta_{13})=0.092\pm 0.008$ ，对应 $\chi^2/\text{NDF}=166/171$ 。

大亚湾中微子实验主要包括三个实验厅，每个实验厅都包含了反中微子探测器和 Muon 探测器，前者即是为了探测大亚湾核反应堆产生的反中微子，而后者则是为了屏蔽周围岩石放射性和探测 Muon 以压低本底对整个实验的影响。对探测器状态的监测和控制则需要探测器控制系统来完成。探测器控制系统需要监测和控制的系统包括：高压电源、VME 机箱、温湿度监测、气体系统、刻度系统等；这些系统包含了 8000 多个监测点，多种硬件类型和通讯协议。

考虑到大亚湾实验对探测器控制系统的要求，探测器控制系统被设计为分布式控制系统的架构，主要包括服务端 (server) 和客户端 (client)。服务端包括硬件部分和软件部分，硬件部分包括各合作组成员采购的商业产品以及开发的各种数据采集设备；软件部分负责硬件的数据采集及控制，同时需要实现数据的分布式管理，在探测器调试时期为实验及值班人员提供足够的界面，并提供足够的错误及报警信息，使他们可以轻松监测和控制探测器。客户端主要负责接收来自服务端的数据，实现对所有探测器的状态监测；并向服务端发送命令来完成对硬件层的控制；提供足够的界面及错误和报警信息。目前大亚湾实验的控制系统运行良好。本论文将详细阐述大亚湾中微子实验探测器控制系统的设计与实现。

本论文的另一部分工作是惰性中微子的研究。LSND 和 MiniBooNE 的实验中出现了一个约 1eV^2 的质量平方差，而 3 味中微子是无法组成这个质量平方差的，因此暗示了惰性中微子的存在。对反应堆反中微子流量 ($\nu/\text{fission}$) 的重新计算，以及将中子寿命时间的更新，使得以前反应堆实验中的中微子探测数量与期望值之比小了 5.7%，这个现象就称为反应堆反中微子异常，也可以由惰性中微子来解释。本文利用大亚湾的实验数据对惰性中微子进行了研究，给出了在质量平方差小于 0.1eV^2 时对 θ_{14} 最好的排除精度。

关键字：大亚湾中微子实验，探测器控制系统，分布式控制系统，服务端，客户端，惰性中微子

Design and Implementation of the Daya Bay Detector Control System and Study of Sterile Neutrino

Shuhua Zhang

Directed by Prof. Yifang Wang

Abstract

After being predicted and detected, cause of the difficulty to be detected and the challenge to the standard model, neutrino becomes one of the most active field in the particle physics. Thanks to the fact that the neutrino oscillation was discovered, physical scientists realized that neutrino has mass and flavour mixing feature. The value of θ_{13} , the mixing angle of the neutrinos, has very important impact on cosmogony, grand unified theory of particle physics, and the development direction of the neutrino physics. Considering both the rate and shape information, Daya Bay reactor neutrino experiment collaboration released the newest result, $\sin^2(2\theta_{13})=0.092\pm 0.008$, with $\chi^2/\text{NDF}=166/171$.

Daya Bay neutrino experiment is performed mainly in three halls, each of which has an antineutrino detector and a Muon detector; the former is for detect the antineutrino, and the latter is aimed to shield the radioactivity of surrounding rock and detect Muon to reduce the impact of the backgrounds. Detector control system will monitor the status of detectors and operate detectors. Detector control system will monitor and control specific systems, such as high voltage power supply, VME crate, temperature and humidity, gas, calibration and so on. These specific systems have over 8000 data points for detecting and controlling, as well as various hardware types and communication protocols.

Detector control system is designed as a distributed control system, consisting of server part and client part. Server part consists of hardware and software, hardware includes industrial products and various electronic board developed by collaborators, software is for detecting and controlling the hardware and publishing the data as a server, saving data to database, providing enough user interfaces, error and alarm information to user when detectors are debugged. Client part is for receiving data from the server part and sending commands to it, providing enough user interface, error and alarm information to user. The detector control system has been running well until now. This thesis will explain the design and implementation of detector

control system in detail.

And this thesis will also represent the study of the sterile neutrino. The LSND and MiniBooNE experiment hinted the exist of sterile neutrino. After recalculating the reactor antineutrino flux and evolving the the neutron mean lifetime from 926s to 885.7s, the ratio of detected antineutrino to expected antineutrino reduces 5.7%, which is called reactor antineutrino anomaly. By studying of the sterile neutrino with the data set of Daya Bay neutrino experiment, this thesis gave a best excluding ability of θ_{14} at quality square difference less than $0.1eV^2$.

Key words: Daya Bay neutrino experiment, detector control system, distributed control system, server, client, sterile tineutrino

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 大亚湾中微子探测实验	2
1.2.1 大亚湾中微子探测实验介绍	2
1.2.2 大亚湾中微子探测实验探测器介绍	3
1.2.2.1 反中微子探测器	3
1.2.2.2 Muon 探测器	4
1.3 当今高能物理实验中的探测器控制系统	4
1.3.1 ATLAS Pixel Detector 探测器控制系统	5
1.3.2 The Hades 探测器控制系统	7
1.4 论文主要工作难点及论文组成	8
1.4.1 论文主要工作及难点	8
1.4.1.1 探测器控制系统	8
1.4.1.2 惰性中微子研究	9
1.4.2 论文组成	9
第 2 章 大亚湾探测器控制系统的设计与实现	11
2.1 大亚湾探测器控制系统设计	11
2.1.1 大亚湾探测器控制系统需求分析	11
2.1.2 大亚湾探测器控制系统构架设计	13
2.1.2.1 分布式控制系统	14
2.1.2.2 服务端	15
2.1.2.3 客户端	16
2.1.2.4 数据库及查询	17
2.1.3 大亚湾探测器控制系统的数据库	17
2.2 控制软件 SCADA 选用	18
2.2.1 控制软件数据采集与监视控制系统开发平台	18
2.2.1.1 SCADA 开发平台介绍	18
2.2.1.2 SCADA 开发平台选用	19

2.2.1.3	分布式数据管理.....	21
2.3	控制软件框架的设计与实现	22
2.3.1	控制软件功能需求	22
2.3.2	控制软件的设计框架	23
2.3.2.1	配置模块.....	24
2.3.2.2	数据采集及控制模块.....	25
2.3.2.3	数据库模块.....	27
2.3.2.3.1	数据库模块设计	27
2.3.2.3.2	数据库的设计	28
2.3.2.4	错误、报警、日志模块.....	32
2.3.2.5	系统支持模块.....	34
2.3.2.6	界面.....	35
2.3.2.7	分布式模块.....	35
2.3.2.8	主程序.....	37
2.3.2.9	数据池.....	38
2.4	控制系统的设计与实现	38
2.4.1	高压监控系统	39
2.4.1.1	PMT 的高压监控系统.....	39
2.4.1.1.1	需求分析	39
2.4.1.1.2	配置模块	39
2.4.1.1.3	数据采集及控制模块	41
2.4.1.1.4	数据库表的设计	42
2.4.1.1.5	PMT 高压主界面	43
2.4.1.2	RPC 的高压监控系统.....	45
2.4.1.3	高压机箱插件与终端设备对应关系.....	45
2.4.2	VME 机箱监控系统	46
2.4.2.1	需求分析	46
2.4.2.2	SNMP 协议	47
2.4.2.3	VME 机箱中物理量的 OID 码	48
2.4.2.4	数据采集及控制	49
2.4.2.5	配置模块	51
2.4.2.6	数据库表的设计	53
2.4.2.7	主界面	53
2.4.3	基于 DIM 的监控系统.....	54

2.4.3.1	需求分析	54
2.4.3.2	Name Server、Server、Client 的设置	54
2.4.3.3	数据采集模块	55
2.4.3.3.1	DIM Client 读取 Service 的方式——Service Type.....	55
2.4.3.3.2	程序设计.....	55
2.4.3.4	配置信息数据结构	57
2.4.3.5	主界面	58
2.4.4	AD 端盖监测系统.....	59
2.4.4.1	需求分析	59
2.4.4.2	AD 端盖监测系统本地监控软件的整合	60
2.4.4.2.1	配置模块.....	60
2.4.4.2.2	数据采集部分程序设计.....	61
2.4.4.2.3	数据存储、报警判断及显示.....	62
2.4.4.2.4	主界面.....	64
2.5	全局控制系统	65
2.5.1	全局控制系统设计	65
2.5.1.1	本地监控系统模块.....	66
2.5.1.2	配置信息模块.....	69
2.5.1.2.1	参数配置信息	70
2.5.1.2.2	系统配置信息	72
2.5.1.3	界面显示.....	73
2.5.1.4	主程序.....	74
2.5.1.5	主界面.....	76
2.5.2	数据库存储服务器	76
2.5.3	Web 数据查询服务器	76
2.6	性能分析	77
2.7	总结及展望	78
第 3 章	惰性中微子研究	80
3.1	中微子振荡	80
3.2	惰性中微子简介	80
3.2.1	LSND 实验与 MiniBooNE 实验分析.....	81

3.2.2 反应堆反中微子异常	83
3.3 大亚湾中微子振荡分析	85
3.3.1 大亚湾反应堆中微子实验	85
3.3.2 大亚湾中微子振荡 3+1 模型	88
3.4 大亚湾反应堆反中微子实验惰性中微子分析	90
3.4.1 大亚湾实验数据及 IBD 挑选	90
3.4.2 大亚湾实验相关误差输入	91
3.4.2.1 测量能谱修正与本底及其误差	91
3.4.2.2 反应堆相关系统误差	95
3.4.2.3 探测器相关系统误差输入	97
3.4.3 分析方法 (χ^2)	99
3.4.3.1 χ^2 的定义	99
3.4.3.2 χ^2 中的误差输入	99
3.4.3.3 χ^2 的拟合过程	101
3.4.4 实验结果分析	102
3.4.4.1 不同基线的分析	102
3.4.4.2 能量分辨分析	102
3.4.4.3 绝对探测效率分析	104
3.4.4.4 将 θ_{13} 作为自由变量的分析	104
3.4.4.5 与其他实验结果对比	105
3.5 小结	106
第四章 总结与展望	107
附录一 大亚湾数据表命名规则	108
附录 1.1 数据表命名规则——SITE	108
附录 1.2 数据表命名规则——MainSystem	108
附录 1.3 数据表命名规则——SubSystem	108
附录二 DIM Service 中数据类型描述	109
附录三 各子系统 command service 数据格式	109
附录 3.1 高压监控系统	109
附录 3.2 VME 机箱监控系统	110
附录 3.3 气体监控系统	110

附录四 更新配置文件对应 DIM Command Service 的命令定义.....	111
附录 4.1 本地监控系统.....	111
附录 4.2 全局监控系统.....	111
附录五 VME 机箱监控物理量的 OID 码及其数据类型.....	112
参考文献.....	114
发表文章.....	118
致谢.....	119

插图目录

图 1	大亚湾核电站实景.....	3
图 2	大亚湾实验厅布局.....	4
图 3	ATLAS Pixel Detector 探测器控制系统功能需求	5
图 4	FIT-SIT 架构.....	6
图 5	树形管理结构.....	7
图 6	大亚湾中微子实验各实验厅以及控制室位置分布.....	13
图 7	探测器控制系统架构.....	14
图 8	探测器控制系统数据流.....	18
图 9	LabVIEW 程序框图.....	20
图 10	DIM Client/Server 工作模式	21
图 11	控制系统模块化设计框架.....	24
图 12	物理量数据数组.....	25
图 13	控制部分实现框图.....	26
图 14	操作转化为命令程序框图.....	27
图 15	通过读取命令实现操作程序框图.....	27
图 16	数据库模块数据流.....	28
图 17	AD 探测器高压监控系统相关实体及其属性.....	30
图 18	数据库逻辑结构.....	30
图 19	错误处理流程.....	33
图 20	自动创建日志路径 VI 框图.....	34
图 21	DIM Service 发布程序框图.....	36
图 22	DIM Command Service 程序框图	36
图 23	主程序流程图.....	37
图 24	CAEN 高压机箱 SY1527.....	39
图 25	PMT 高压的配置信息.....	40
图 26	配置信息存储提示框.....	41
图 27	CAENHV Wrapper 的使用	42
图 28	PMT 高压监控程序主界面.....	44
图 29	PMT 高压控制界面.....	45
图 30	W-IE-NE-R VME 机箱.....	46
图 31	MIB Browser 读取 VME 机箱 OID 信息	48
图 32	VME DAQ 流程图.....	49
图 33	SNMP Get Request.....	50
图 34	SNMP Get Response.....	50

图 35	VME 机箱返回信息.....	50
图 36	SNMP Set Request.....	51
图 37	VME 参数配置界面.....	52
图 38	VME 监控软件主界面.....	53
图 39	温度探头数据趋势.....	55
图 40	DIM Client 程序框图.....	56
图 41	DIM Client 流程图.....	56
图 42	DIM Client DAQ 程序框图.....	57
图 43	温湿度监测系统主界面.....	58
图 44	AD 安装的各种设备和探头.....	59
图 45	AD AllSensorReadoutCore IO.....	60
图 46	AD 端盖监测系统的参数配置界面.....	61
图 47	AD Lid Sensor DAQ.....	62
图 48	存储数据队列并进行标识.....	63
图 49	删除数据队列元素及标识.....	63
图 50	复位标识程序框图.....	64
图 51	AD 端盖监测系统网页查询数据.....	64
图 52	AD 端盖监测系统主界面.....	65
图 53	全局控制系统组成模块.....	66
图 54	本地监控系统模块流程图.....	67
图 55	读配置文件流程.....	68
图 56	DIM Command Server 流程图.....	69
图 57	DIM Command Server 程序框图.....	69
图 58	SVN 文件管理流程图.....	70
图 59	SVN 命令执行程序框图.....	71
图 60	大亚湾全局控制系统界面树形管理.....	73
图 61	配置信息及树形控件显示.....	74
图 62	全局控制系统主程序流程图.....	75
图 63	全局控制系统主界面.....	76
图 64	web 查询方式流程图.....	77
图 65	监控软件资源占用情况.....	78
图 66	三代中微子振荡.....	80
图 67	MiniBooNE 实验与 LSND 实验的 Δm^2 与 $\sin^2 2\theta$ 允许的范围.....	82
图 68	短基线反应堆反中微子异常.....	84
图 69	ILL 实验的 $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) - \Delta m^2_{\text{new}}$ 排除区域.....	84

图 70	$\sin^2(2\theta_{\text{new}}) - \Delta m_{\text{new}}^2$ 允许区域	85
图 71	大亚湾实验中核反应堆与探测器的布局图	86
图 72	电子反中微子存在机率随中微子传播距离与能量比值的变化	87
图 73	3+1 中微子模型电子反中微子存在机率随 L/E 的变化走势	90
图 74	偶然符合本底能谱	92
图 75	快中子本底能谱	93
图 76	$^9\text{Li}/^8\text{Hi}$ 本底能谱	94
图 77	Am-C 源本底能谱	94
图 78	Alpha-n 本底能谱	95
图 79	裂变分支误差与反中微子能量对应关系	96
图 80	1% 的能标平移引起的中微子能谱变化百分比	98
图 81	非线性曲线的最佳拟合值和误差带	98
图 82	EH1+EH2 与 EH1+EH2+EH3 的结果对比	102
图 83	AD1 快信号能谱	103
图 84	29 个 bin 与 58 个 bin 对应 $\sin^2 2\theta_{14}$ 与 Δm_{41}^2 排除曲线	103
图 85	考虑绝对探测效率误差后 $\sin^2 2\theta_{14}$ 与 Δm_{41}^2 排除曲线	104
图 86	θ_{13} 作为自由变量的影响	105
图 87	Δm_{41}^2 为 0.002 时 4 代中微子与 3 代中微子振荡周期对比	105
图 88	大亚湾实验与其他反应堆实验的比较	106
图 89	气体监控系统命令格式定义	111

表格目录

表 1	各厅水切伦科夫探测器 PMT 数量.....	12
表 2	数据表格式——单数据.....	31
表 3	数据表格式——组数据.....	31
表 4	结构表.....	31
表 5	错误信息.....	32
表 6	高压报警信息.....	33
表 7	日志信息.....	34
表 8	SNMP 报文数据结构.....	47
表 9	VME 机箱进行写操作的命令信息.....	51
表 10	全局控制系统报警信息格式.....	68
表 11	基于新旧计算方法的中微子探测值与期望值之比.....	83
表 12	各探测器到反应堆的基线.....	86
表 13	探测器效率及其误差.....	97
表 14	IBD 与本底事例相关误差.....	100
表 15	反应堆相关误差.....	100
表 16	探测器相关误差.....	100
表 17	置信范围与 $\Delta \chi^2$ 对应关系.....	101
表 18	VME 机箱监控系统命令格式定义.....	110
表 19	气体监控系统软件命令格式定义.....	111

第 1 章 绪论

1.1 引言

中微子是组成物质世界的基本粒子之一，具有不带电、质量轻（小于电子的百万分之一）只参与非常微弱的弱相互作用、手征性、混合性等特点，加之它对标准模型提出一定挑战，使得它成为粒子物理学中最活跃的研究领域之一。随着中微子振荡的发现，中微子具有微小质量和味混合的特性被揭示，它进一步获得了来自物理学理论和实验领域的更多关注[1]。

1914 年英国科学家查德威克 (J. Chadwick) 在进行 β 射线能谱测量时，意外地发现其能谱呈连续分布[2]。这对当时物理学界对动量和能量守恒的认识提出了挑战。1930 年泡利 (W. Pauli) 为解决这个实验结果的挑战，提出了一个假说，即 β 衰变释放出一种类似于中子的粒子，它的自旋为 $1/2$ 、质量很小、相互作用微弱，在实验中很难被探测到[3]。费米 (E. Fermi) 将它命名为中微子 (neutrino)，并预言它的质量可能为零[4]。1942 年中国物理学家王淦昌首次提出用轻核的 K 壳层电子俘获的方法来探测中微子[5]，后来又提出了用重核裂变的方法来探测[6]。1952 年艾伦 (J.S. Allen) 和罗德巴克 (G.W. Rodeback) 合作，首次完成了 K 壳层电子俘获的实验，间接验证了中微子的存在。

1956 年美国洛斯阿拉莫斯实验室的雷因斯 (F. Reines) 和柯恩 (C.L. Cowan, Jr.) 等人经过艰苦工作，直接探测到了大型裂变反应堆产生的中微子[7]，即后来知道的反电子中微子。同年，杨振宁和李政道共同提出弱相互作用宇称不守恒定律[8]，并且吴健雄很快用实验对此理论进行了证实[9]。这为后来建立的弱相互作用的 V-A 理论[10]和描述中微子二分量的理论[11]起到了巨大的推动作用。二分量中微子理论认为中微子是无质量的确二分量的旋量粒子，并且具有手征性。1962 年，美国科学家莱德曼 (L.M. Lederman)，舒瓦茨 (M. Schwartz) 和斯坦伯格 (J. Steinberger) 发现第二种中微子—— μ 中微子[12]。随后标准模型逐渐建立[13,14]，将粒子分为三代，并可以把各种粒子很好的统一起来，而且可以得到实验的证实[15]。2001 年 DONUT 合作组在欧洲正负电子对撞机实验中找到了标准模型理论预言的第三代中微子—— τ 中微子[16]。在三代费米子的标准模型中，中微子仍然是没有质量的，只具有左手手征性，在相互作用中轻子数守恒，三种中微子之间不存在转化。

1998 年日本超级神冈实验以确凿证据发现中微子振荡现象[17]，这证明了中微子具有微小的质量。随后，中微子振荡现象得到了更多实验的证实。2001 年，加拿大 SNO 实验证实失踪的太阳中微子转换成了其它中微子[18]，验证了太

阳标准模型是正确的。2002 年，日本 KamLAND 实验利用反应堆中微子实验证实了太阳中微子振荡[19]。2003 年，日本 K2K 实验用加速器证实大气中微子振荡[20]。2006 年，美国 MINOS 实验进一步用加速器证实大气中微子振荡[21]。通过这些实验可以肯定地说，中微子是有质量的，中微子振荡现象是确切存在的。

中微子振荡可以由六个参数决定（另外还有两个与振荡无关的相位角），包括三个混合角 θ_{12} 、 θ_{23} 、 θ_{13} ，两个质量平方差 Δm_{21}^2 、 Δm_{32}^2 ，以及一个电荷宇称相位角 δ_{CP} 。通过大气中微子振荡测得了 θ_{23} 与 $|\Delta m_{32}^2|$ ，通过太阳中微子振荡测得了 θ_{12} 与 Δm_{21}^2 。在大亚湾中微子实验之前，混合矩阵中，只有下面的两个半参数还没有被测量到：最小的混合角 θ_{13} 、CP 破缺的相位角 δ_{CP} 以及 Δm_{32}^2 的正负。其中 θ_{13} 只能给出实验的上限是： $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$ [22]。

混合角 θ_{13} 的数值大小决定了未来中微子物理的发展方向。在轻子部分，所有 CP 破缺的物理效应都与 θ_{13} 有关，所以 θ_{13} 的大小关系着 CP 对称性的破坏程度。如果如人们所预计的 $\sin^2 2\theta_{13}$ 等于 1%~3%的话，则中微子的电荷宇称（CP）相角可以通过长基线中微子实验来测量，宇宙中物质与反物质的不对称现象可能得以解释。如果它太小，则中微子的 CP 相角无法测量，目前用中微子来解释物质与反物质不对称的理论便无法证实。 θ_{13} 接近于零也预示着新物理或一种新的对称性的存在。因此不论是测得 θ_{13} ，或证明它极小（小于 0.01），对宇宙起源、粒子物理大统一理论、以及未来中微子物理的发展方向等均有极为重要的意义[23]。

1.2 大亚湾中微子探测实验

θ_{13} 可以通过反应堆中微子实验或长基线加速器中微子实验来测量。在长基线中微子实验中，中微子振荡几率跟 θ_{13} 、CP 相角、物质效应、以及 Δm_{32}^2 的符号有关，仅由一个观测量实际上无法同时确定它们的大小。而反应堆中微子振荡只跟 θ_{13} 有关，可以干净地确定它的大小，实验的周期与造价也远小于长基线中微子实验。大亚湾反应堆中微子探测实验，就是一个依靠核反应堆来对 θ_{13} 进行精确测量的实验。

1.2.1 大亚湾中微子探测实验介绍

大亚湾反应堆中微子探测实验将依托位于我国广东省大亚湾地区的核反应堆群建设。大亚湾核反应堆群包括大亚湾核电站（两个核反应堆）和岭澳核电站（两个核反应堆），它们的总热功率达到了 11.6GW，世界排名第十。而且 2011 年岭澳二期的两个反应堆也开始发电，成为了世界第二大的反应堆群，总热功率达到 17.4GW。而且紧靠这些反应堆就有比较高的山，在距反应堆 300 到 500 米处，山高已经达到了 100 米以上；在距离反应堆约 2 公里（振荡极大值）处山高

更是达到了约 400 米。并且山体由整体的花岗石构成，非常利于开凿隧道和建造大型地下实验室[24]。较大的热功率保证了中微子的产量，紧邻高山又为地下实验室屏蔽较多的本底提供了条件。这些条件可以说在世界核反应堆群中都是不多见的，依托这些得天独厚的地理位置优势，以及优秀的探测器设计，大亚湾中微子实验提出了将 $\sin^2 2\theta_{13}$ 测量到 0.01 或更高的精度的目标。图 1 是大亚湾核电站的实景图。



图 1 大亚湾核电站实景

1.2.2 大亚湾中微子探测实验探测器介绍

大亚湾中微子探测实验的实验厅布局包括三个实验厅，大亚湾近厅、岭澳近厅和一个远厅，它们之间由水平隧道连接，如图 2 所示。为了达到 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的最高测量精度，反中微子探测器（Antineutrino Detector, AD）最优化的摆放是：在远点放置 4 个探测器，每个近点放置 2 个探测器。根据不同的功能，大亚湾中微子探测实验的探测器主要分为反中微子探测器和 MUON 探测器。

1.2.2.1 反中微子探测器

图 2 中 8 个圆柱形探测器就是 AD。每个 AD 由套在一起的三个圆柱形结构组成，包括最外层的不锈钢钢罐和里面两层有机玻璃罐；将 AD 分成了 3 个部分，最外层为白油层，中间是液闪层，最内层的掺 Gd 液闪是测量中微子的靶。通过在 AD 中发生的反 β 衰变，AD 可以探测到中微子。为了达到最高的测量精度，4 个 AD 被放在远厅，也就是靠近第一个振荡极大值处。在每个近厅放置 2 个 AD 来探测相对于它们各自的核反应堆在短基线上的中微子存在几率和能量分布，这样可以把由反应堆功率的不确定性引起的 $\sin^2 2\theta_{13}$ 系统误差降到 0.1%。AD 被放在 2.5 米的水池中，来减弱环境岩石中的放射性和散裂中子的影响。



图 2 大亚湾实验厅布局

1.2.2.2 Muon 探测器

Muon 探测器是用来探测宇宙线产生的 Muon 粒子，它由一个水切伦科夫（Water cherenkov）探测器和一个 RPC（Resistive Plate Counter）气体探测器组成。MUON 探测器的作用主要有两点，一个是压低岩石中放射性和宇宙线 MUON 在岩石中产生中子(测不到)的影响，另一个是探测宇宙线 Muon，通过对时间窗口的选取来排除 Muon 本底[25]。

1.3 当今高能物理实验中的探测器控制系统

由于高能物理实验的特性，其探测器越来越趋向于大型化，实验中所用的硬件设备的种类和数量也是越来越庞大。比如北京谱仪的探测器控制系统，共有约 9000 个监控点，4000 个硬件通道，所使用的硬件设备包含了 30 余种物理量，如果仅是靠人来监测并控制这些硬件设备几乎是不可能的。探测器控制系统需要解决的就是这个问题。探测器控制系统的目标就是对探测器监测和控制，以保证整个实验的安全运行。探测器控制系统一般包含两部分：硬件部分和软件部分。硬件部分是负责采集物理量；软件部分则是帮助实验人员实现对硬件部分的监测和控制。

1.3.1 ATLAS Pixel Detector 探测器控制系统

1. 功能: 作为 ATLAS 控制系统的一部分, 探测器控制系统的主要功能为: 接收中心控制站的大量命令, 并返回探测器简要的状态; 提供给专家和值班人员充足的用户界面; 并且要给值班人员提供足够的错误报告功能; 将所选的监测量存储到数据库, 并提供历史数据查询; 默认参数可以通过命令启用; 可以与读出系统通讯等。图 3 为 ATLAS Pixel Detector 探测器控制系统功能需求分布图。



图 3 ATLAS Pixel Detector 探测器控制系统功能需求

2. 组成: 由本地控制站及多个子系统组成, 硬件通道总数达到 7000 多个。子系统包括: 高压系统, 低压系统, 冷却系统, 环境监测系统等[26]。
3. SCADA(supervisory control and data acquisition system, 即监控与数据采集系统): 选择的是西门子公司的 PVSS 商业组态软件。作为商业组态软件其具有很多特点, 如:
 - 跨平台, 对 Windows, Linux 和 Unix 等各种系统都能完全支持;
 - 支持庞大的数据点, 单个站点最大支持 10,000,000 点; 站点的数量可以支持 2000 个;
 - 作为标准的 SCADA 系统开发平台支持多种硬件接口及通讯协议;
 - 具有多级冗余功能, 包括数据采集与处理冗余, 数据存储冗余, 其

中数据存储部分采用了群集技术与存储转发技术；

- 使用了实时数据库-RAIMA，可以快速高效处理来自不同设备的各种数据；
- 集成了标准的数据库接口，而且可以使用第三方数据库，可以对数据进行长期的保存和维护；
- 集成了 Web 服务器，用户可以通过 IE 浏览器等访问并获得系统的全部数据以及操作；
- 集成了 Video 视频管理组件，支持将各种摄像头视频信息采集到 PVSS 平台，同时可以转发到各类终端显示设备；
- 可以将用户感兴趣的信息发送到用户的手机，方便用户查看；
- 具有强大的错误诊断工具，采集到的数据的各种状态监控软件可以以图形的方式显示。使用系统的用户可以方便监控系统的各种状态，监测错误信息和解决错误；
- 支持与多种应用程序的标准接口及协议，如：OPC、ODBC、DDE 等，支持 ANSI-C 脚本语言；也提供了各类 API 函数的程序开发包，可以用于对未来新功能的扩展[27]。

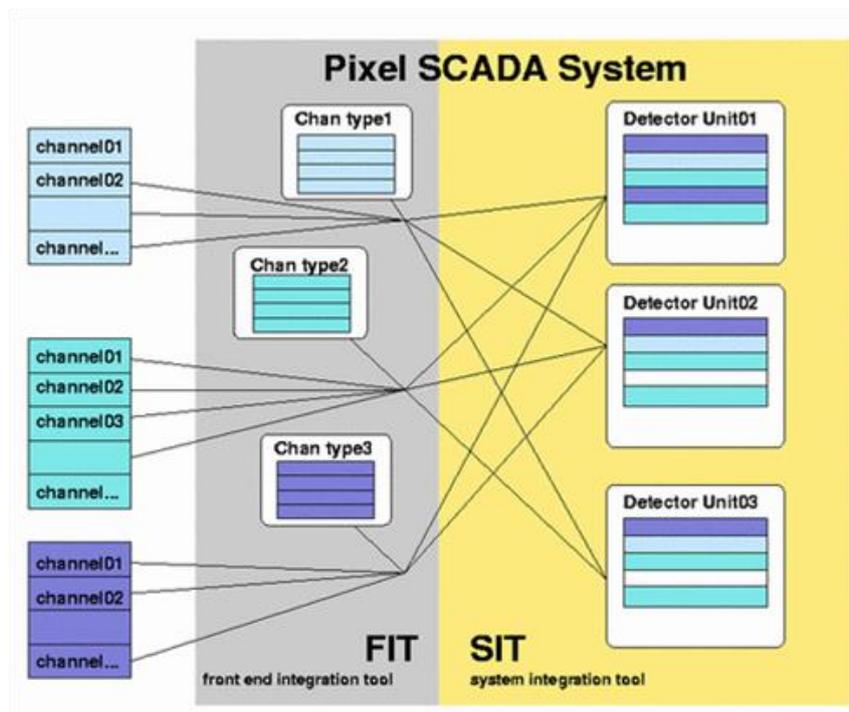
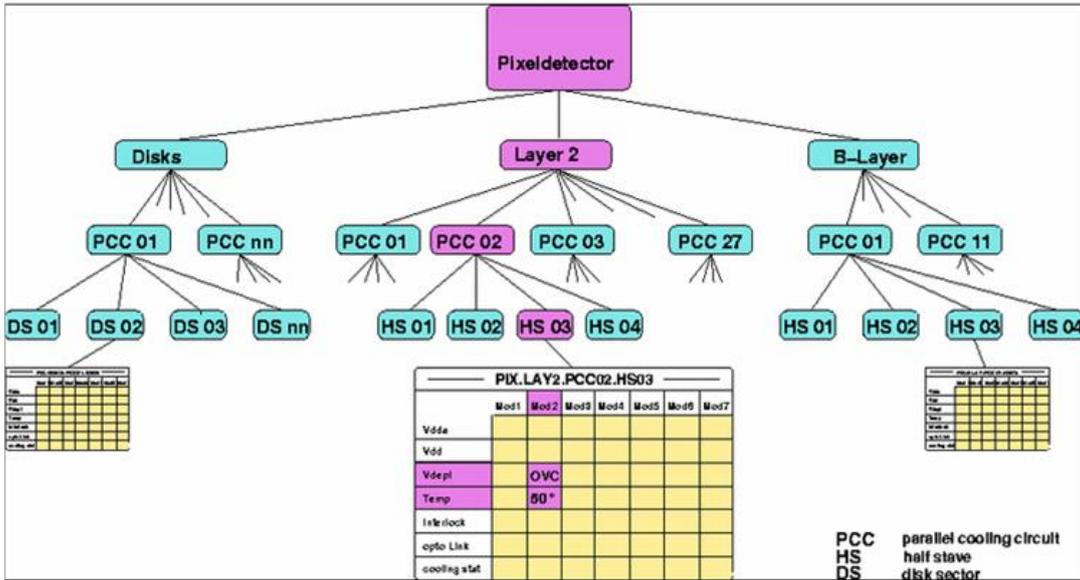


图 4 FIT-SIT 架构

4. 架构 FIT-SIT: FIT(front end integration tools)整合大量的同类型设备，使

用户可以处理成组的同类型的硬件通道。SIT(system integration tool)将一个探测器相关联的所有硬件通道整合到一个系统中。图 4 为 FIT-SIT 架构的示意图。

5. 树形结构管理：对于一个探测器，这种方法可以使用户在同一个软件中去操作些探测器不同的硬件组成；并且树形的结构使用户可以清晰的管理非常大量的数据。图 5 展示了树形结构管理的示意图。



6. 缺点：价格昂贵。

1.3.2 The Hades 探测器控制系统

下面将介绍一下 Hades (The High Acceptance Di Electron Spectrometer[28]) 实验的探测器控制系统。

1. RPC 慢控制系统硬件：

- ETRAX：这个处理器是慢控制系统硬件的核心。这个处理器最大的好处就是可以在嵌入式的 Linux kernel 上运行 EPICS IOC，并且支持 C/C++ 这样的高级语言进行编程。在 TRB 和 HADCON 两块电子学板上均使用了 ETRAX。
- 1-wire bus：为那些提供 1-wire bus 接口的设备测量电压、电流、温度和控制功能。1-wire 的好处是在一条总线上连接非常多的设备，总线长度可以支持到几百米的距离。
- HADCON：为慢控制系统和小型数据获取系统开发的多功能板。主

要包括三个部分：ETRAX、microcontroller(AT90CAN128)、Xilinx CPLD。Microcontroller 用来处理 1-wire buses 信息，并把这些信息发送给 ETRAX。HADCON 通过网络将数据发送给慢控制系统的客户端。另外 HADCON 还支持 RS232 和 CAN 总路线。

- TRB: The Hades 的触发读出板是数据获取系统的核心。由于集成了 ETRAX TRB 也可以满足慢控制系统的使用要求，而且由于慢控制系统使用资源非常少，并不会对数据获取系统产生影响[29]。

2. SCADA: 采用 EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)。EPICS 是上世界 90 年代初由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 和阿贡国家实验室 (ANL) 等联合开发的大型控制软件系统。其具有以下特性[30]:

- 免费;
- EPICS 系统工作模式为 Client/Server 模型, 可以实现分布式数据管理;
- 对于非常大量的数据仍能提供非常好的可靠性;
- EPICS input output controller(IOC), 作为一个服务器应用程序可以运行在很多系统平台上, 例如: Linux 和 Windows 电脑、嵌入式系统等;

3. 缺点: 软件开发上需要更多的具有对 EPICS 非常熟悉的人员, 很多硬件设备的驱动也需要自己开发。

1.4 论文主要工作难点及论文组成

1.4.1 论文主要工作及难点

1.4.1.1 探测器控制系统

大亚湾反应堆中微子实验的探测器控制系统共有 8000 多个监控点。这些监控点对应了多种硬件类型, 其所代表的物理量类型也比较多; 所有这些物理量都需要实现实时监测, 大部分还需要实现报警功能, 其中一部分物理量还需要实现控制功能。在大亚湾中微实验探测器建设阶段, 各个探测器安装好后都要进行调试。探测器控制系统需要在探测器调试阶段及时提供满足调试需求的功能, 并根据不同需求对软件进行调整。

大亚湾实验的探测器控制系统可分为两部分: 硬件部分和软件部分。硬件部

分主要包括直接采购的商业产品和由各合作组成员根据需要开发的硬件产品。其中商业产品包括高压机箱、VME 机箱、温度探头、服务器、电脑等；而探测器控制组和合作组成员开发的多为嵌入式系统，包括低压电源监测电子学板、温湿度监测电子学板、Muon 刻度监控电子学板、气体监测电子学板等。硬件部分所包含的物理量主要为：电压、电流、温湿度、气体压力、气体流量、开关量等。软件部分主要包括根据不同硬件开发的各种监控软件、为控制室值班人员开发的全局监控软件、数据库系统、以及采用网页浏览方式的数据查询系统。

大亚湾探测器控制系统的主要难点在于其对数据实现分布式管理的需求。由于大亚湾实验的各个实验厅和控制室的特殊分布，在实验正常运行时，各实验厅无人值班，而只在控制室有人值班；因此值班人员在控制室需要可以监测所有实验厅的各种探测器的全部状态，并且需要对探测器实现所有的控制功能；这些要求需要大亚湾探测器所有的监测数据和控制都要实现分布式管理。而大亚湾的 SCADA 开发平台选用的是 LabVIEW，这在当今高能物理实验中使用并不广泛，而且 LabVIEW 本身并不擅长对大数据量的数据实现分布式管理。

大亚湾探测器控制系统的另一难点是探测器控制系统对控制系统整体软件框架提出的要求。大亚湾实验的各个实验厅运行的本地探测器控制系统实现就近取数及控制，在控制室运行全局控制系统实现值班人员对探测器的实时监测和控制。由于全局控制系统需要实现对探测器的所有监测功能，全局控制系统与本地控制系统的要求协调一致。同时一些硬件设备由合作组成员开发并调试，最后需要将其开发的数据采集模块集成到控制系统的整体软件框架中，以提供控制系统所有的功能。

1.4.1.2 惰性中微子研究

惰性中微子是在标准模型中 3 味中微子之外引入的一种中微子，它不直接参与弱相互作用，但可以通过中微子振荡与标准模型中的 3 味中微子混合。LSND 实验[31]和 MiniBooNE 实验[32]暗示了惰性中微子的存在，在其实验中发现了一种振荡对应的质量平方差在 1eV^2 左右，现有的 3 味中微子无法组合出这种质量平方差，所以需要引入一种新的中微子来解释。2011 年，G. Mention 与 M. Fechner 等人对以前的多个短基线（小于 100 米）反应堆实验进行了重新分析；通过对反应堆反中微子流量 ($\bar{\nu}/\text{fission}$) 的重新计算，以及将中子寿命从以前的 926 秒更新为 885.7 秒，使得以前反应堆实验中的中微子探测数量与期望值之比小了 5.7%，他们把这个现象就称为反应堆反中微子异常[33]，也引入惰性中微子对这种现象进行解释。本文将用大亚湾的实验数据对这种惰性中微子进行研究。

1.4.2 论文组成

本论文共分为 3 章，其主要内容分别为：

第一章：介绍大亚湾反应堆中微子实验。

第二章：大亚湾中微子实验的探测器控制系统。

分布式控制系统的需求与实现

服务端的设计与实现

客户端的设计与实现

大亚湾探测器控制系统的总结

第三章：引入惰性中微子的原因

短基线反应堆实验对于惰性中微子研究的贡献

用大亚湾实验数据对惰性中微子进行研究

第四章：总结与展望

第 2 章 大亚湾探测器控制系统的设计与实现

大亚湾探测器控制系统需要保证大亚湾中微子实验的整体运行,对所有的探测器进行监测及控制。探测器安装阶段,辅助完成设备的安装及调试;探测器运行阶段,完成专家及值班员对探测器的监测及控制。

本文作者完成了大亚湾探测器控制系统的架构设计,并参考北京谱仪慢控制系统的软件框架设计,针对大亚湾探测器控制系统的需求,完成了大亚湾控制系统的软件框架设计,同时,本文作者还完成了多个系统的开发,包括高压监控系统、VME 机箱监控系统、基于 DIM 的多个监控系统、AD 端盖监控系统、Radon 监控系统等。

2.1 大亚湾探测器控制系统设计

根据大亚湾中微子实验中多个实验厅分布较远,最终在控制室对整个实验进行监控的特点,本文作者将大亚湾探测器控制系统整体架构设计为分布式的控制系统,实现了在大亚湾中微子实验局域网内任何位置对实验中的所有设备的监控。

2.1.1 大亚湾探测器控制系统需求分析

大亚湾探测器控制系统的主要目的是保证大亚湾实验各探测器的安全运行,对各探测器状态进行监测,并可以对探测器进行一些控制动作;将监测数据存入数据库,并提供多种查询方式;为值班人员和实验专家提供完善的用户界面,使其能方便的掌握各探测器的状态和控制探测器。

由于大亚湾实验是一个国际合作实验,探测器的设计也是由合作组中的多个成员完成的。硬件的采购和开发也是由不同的合作组成员共同完成的,而在硬件设备设计的同时也需要对其进行调试,因此负责硬件设计的人员将开发硬件的数据采集和控制部分,然后由探测器控制组负责将此部分整合到控制器控制系统中,以提供统一的用户界面及功能。

根据硬件设备的种类,由探测器控制组独立开发的系统主要为:

1. 高压电源监控系统:

大亚湾实验中用到高压电源的探测器包括 AD,水切伦科夫探测器,RPC 气体探测器。而 AD 和水切伦科夫探测器的用到高压电源的设备均为 PMT (photomultiplier tube,即光电倍增管),而 RPC 气体探测器中需要高压电源的设备是 RPC 裸室,且需要正负两种高压。高压电源系统采

用了统一 CAEN SY1527 高压机箱，PMT 选用的高压插件是 A1932，而 RPC 选用的插件是 A1733P 和 A1733N。

每个 A1932 插件可提供 48 路高压，每个高压机箱最多可以使用 8 个 A1932 插件。这样每个高压机箱最多可以提供 384 路高压。而大亚湾实验中共有 8 个 AD，每个 AD 共有 192 个 PMT，这样整个实验中共需要 4 个高压机箱及 32 个 A1932 插件[34]。

各厅水切伦科夫探测器中的 PMT 数量如表 1 所示[35]。所以各厅只需要一个高压机箱即可。

而 RPC 气体探测器中[36]，每个模块含有 4 层 RPC，每层 RPC 需要正负两路高压，每 9 个模块共同使用一路高压串联供电，即每 9 个模块共需要 8 路高压。每个近点的 RPC 模块数量为 6×9 ，因此每个近点需要 48 路高压。远点的 RPC 模块数量为 9×9 ，需要 72 路高压。由于所用高压数量有限，每个厅只需要一个高压机箱即可。

表 1 各厅水切伦科夫探测器 PMT 数量

Site	Inner bottom	Inner sides	Inner total	Outer in-facing	Outer out-facing	Outer total	Grand total
DB Near	20	96	116	109	64	173	289
LA Near	20	96	116	109	64	173	289
Far	32	128	160	128	96	224	384

2. VME 机箱监控系统：

大亚湾实验中各探测器的电子学读出系统都是采用的 Wiener 的 VME 机箱[37]。其中每个 AD 使用一个 VME 机箱，每个厅的 RPC 气体探测器一个 VME 机箱，水切伦科夫探测器的内外水池各使用一个。大亚湾中微子实验中共使用了 17 个 VME 机箱。

3. 温湿度监测系统、气体压力及流量监控系统、低压电源监控系统：

这些系统都采用了嵌入式系统的开发模式，并将采集的数据在前端电子学中发布为 DIM Service，并以 DIM Command Service 的形式接收来自上位机的命令。

其中温湿度监测系统，气体监控系统等电子学部分，由东莞理工大学开发；低压电源监控系统由高能所慢控制组开发。

4. Muon 刻度系统、AD 端盖监测系统、Radon 监测系统

这些系统均由不同的合作组成员分别研发，并提供系统的数据采集和控制部分。然后再由探测器控制组将这些模块整合到探测器控制系统的软件框架中，最终向用户提供具有完全功能的各监控系统软件。

2.1.2 大亚湾探测器控制系统构架设计

大亚湾中微子实验各实验厅以及控制室的位置如图 6 所示。其中 1、2 号厅为大亚湾近厅和岭澳近厅，3 号厅为远厅，红点处为控制室所在位置。当大亚湾所有探测器安装完成之后，将只在控制室设置值班人员，各实验厅并没有人员值班。因此要求探测器控制系统开发在控制室运行的全局控制软件，来让值班人员对大亚湾实验中所有探测器的状态进行监测，并允许值班人员通过全局控制软件对探测器进行必要的控制。由于各实验厅之间距离控制室的位置较远，最近的 300 多米，最远的达到了 1800 多米，这使得将硬件的数据线直接连接到控制室变为不可能。又因为在探测器进行安装及调试期间是在各个实验厅完成的，所以需要开发各系统的本地控制软件，来帮助实验人员对各系统进行监测和控制；同时可以作为一个平台将所有监测到数据发送给控制室的全局控制软件，并接收来自全局控制软件的控制命令。



图 6 大亚湾中微子实验各实验厅以及控制室位置分布

考虑到上述原因，大亚湾探测器控制系统的构架设计如图 7 所示。整个系统设计为分布式控制系统，包含两部分：服务端（Server），由硬件和本地控制软件（Local Control Software, LCS）组成；客户端（Client），由全局控制软件组成（Global Control Software, GCS）。同时所有数据要存入数据库中，并提供 web 查询。

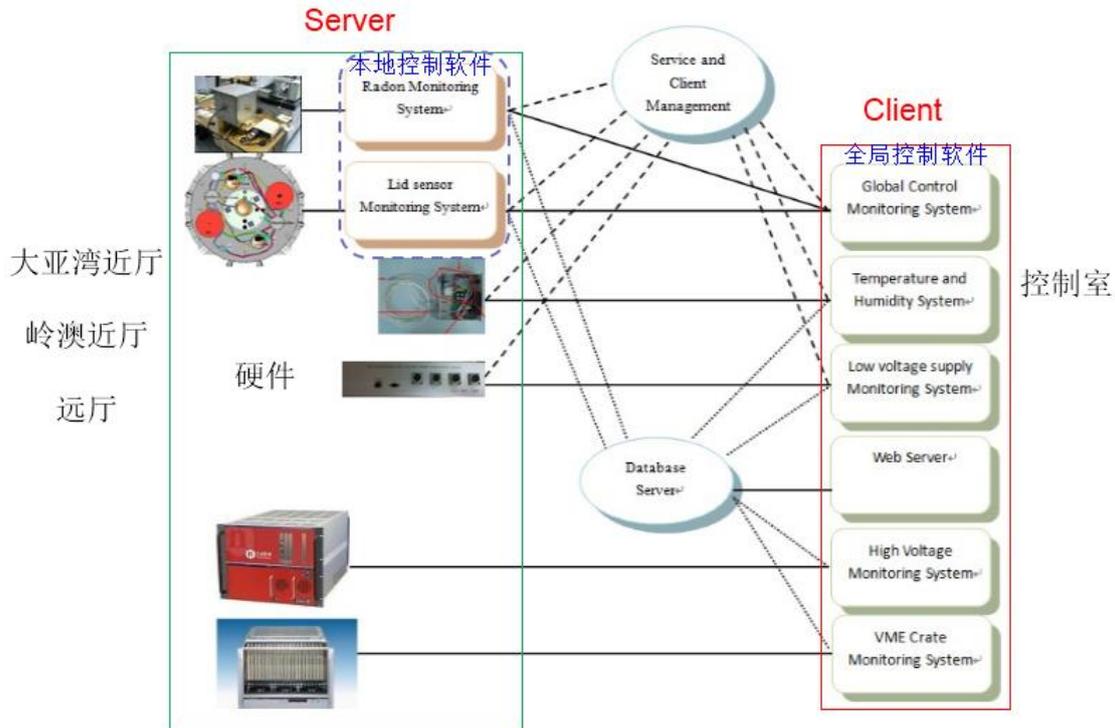


图 7 探测器控制系统架构

2.1.2.1 分布式控制系统

由于大亚湾中微子实验中各个实验厅与控制室的位置关系，使得探测器控制系统对硬件设备进行采集数据并向硬件设备发送命令必须实现分布式管理；并且在控制室的全局控制系统需要可以监测各实验厅探测器的状态，并发出控制命令；因此大亚湾探测器控制系统必须实现分布式控制。并对分布式控制系统提出了以下要求：

1. 可靠性：作为探测器监控系统，对可靠性的要求是最高的。当某一本地控制系统出现错误，无法正常运行时，不能影响其他子系统，并且可以实时监测各本地控制系统的运行状态。
2. 开放性：新增本地控制系统后，可以快速的将其添加到探测器控制系统的网络中；当一些本地控制系统不需要运行时，可以在探测器控制系统中方便的去掉。

3. 灵活性：探测器控制系统应该有统一的框架，采用模块化的设计。在框架的基础上开发新的控制系统要灵活、快速；在用户提出新的需求后，响应速度要及时。
4. 协调性：本地控制系统与全局控制系统之间要传输大量的数据，以及种类众多的控制命令，因此两地的控制系统要有非常好的协调性，才能完成探测器控制系统的总体功能。
5. 易于维护：当本地控制系统或者全局控制系统的计算机出现故障时，都应该在不影响整个探测器系统运行的情况下，实现在线更换，快速排除故障。

2.1.2.2 服务端

大亚湾探测器控制系统的服务端负责将探测器中的各种硬件设备实现分布式管理，也就是将所有的硬件设备设计为服务器，在局域网内任何地方都可以对其进行监测及控制。

大亚湾探测器控制系统的硬件接口种类以及所使用的通讯协议种类都很多。硬件设备与上位机的通讯接口及协议主要包括 TCP/IP、SNMP、DIM Service、COM、RS232 等。

CAEN 的高压机箱、Wiener 的 VME 机箱这类成熟的工业产品，都提供了比较成熟的通讯协议，所以在数据采集及控制部分的软件开发时是可以得到比较好的支持的。这两种硬件设备所使用的协议都是基于 TCP/IP 协议的，而此协议是支持分布式管理的，也就是可以直接作为服务器，所以可以基于这类协议直接开发全局控制软件。

另外一部分监控系统是由合作组成员开发的基于嵌入式系统的硬件，这部分硬件与上位机的通讯协议采用 DIM Service 的形式，给上位机软件的开发带来了便捷性，并且可以很好的实现数据的分布式管理，即全局控制软件可以直接和这部分硬件通讯，所以这部分硬件也可以通过全局控制软件直接监控。

还有一部分硬件则给后面的本地控制软件的开发带来了困难。因为很多硬件是由合作组中的不同成员负责的，虽然要求各个负责硬件采购及开发的合作组成员提供硬件的数据采集及控制部分，但是把这一部分整合到探测器控制系统中来，仍然是探测器控制系统设计中的一个难点。将这一部分整合到探测器控制系统中来的时候，仍然需要了解这部分软件的设计思路，而由于很多人在参与这部分软件的开发，所以设计思想迥异，给软件的整合带来了困难。这部分硬件设备是不支持分布式数据管理的，所以需要设计本地控制软件，同时还要实现分布式数据

管理。

2.1.2.3 客户端

客户端的功能是向专家及值班员提供对探测器的监测及控制，主要是运行在控制室的全局控制软件。探测器进行安装调试时，需要本地控制软件提供对探测器的监测及控制功能。因此，本地控制软件和全局控制软件大部分功能是相同的，可以统一考虑这两部分控制软件的设计与开发。本文作者参考北京谱仪慢控制系统的软件框架，根据大亚湾探测器控制系统的需求，开发了满足大亚湾探测器控制系统的软件框架。

如图 7 所示，本地控制软件直接负责与各硬件设备通讯，包括采集来自硬件设备的各种数据，同时也要向硬件设备发送各种控制命令；同时也需要实现硬件设备的分布式管理，也就是与硬件设备组成一个服务端。全局控制软件则是作为客户端对服务端设备进行监控。

图 7 中绿色框内只展示了一个实验厅内的部分设备，而大亚湾实验中有 3 个实验厅，控制系统众多，因此为每个系统单独开发控制软件将消耗大量的时间。因此需要对控制系统的功能进行整合，开发一套具有统一功能的控制软件框架。为了使整合更为便利，尽量把软件框架设计为按照功能区分的各种模块。

考虑大亚湾实验对控制系统提出的需求，控制软件应该具有的功能为：数据显示、异常报警、错误信息提示、数据存储、分布式管理、配置信息管理、软件管理等。

由于大亚湾探测器控制系统要求全局控制系统能监测所有探测器的物理量，并对其进行控制。所以本地控制软件的分布式管理必须将所有本地监测到的数据发送给全局控制软件，并能接收全局控制软件的命令，并把这些命令转化为对硬件层设备的操作；这也是实现分布式控制系统的基础。

硬件设备的安装、调试期间，主要在各个实验厅进行，本地控制软件需要协助实验人员完成对各探测器的调试；支持分布式管理的硬件设备的监测及控制也需要在实验厅运行。这对控制软件提出了如下要求：

1. 提供足够多的数据显示界面：将来自硬件层的各种数据显示出来。为了实验人员观察数据的方便，提供多种数据显示方式，如某一数据在一段时间内的曲线，可以帮助实验人员非常清晰的观察这个数据的变化趋势。
2. 提供足够的操作功能：有一些硬件设备需要通过控制软件对其进行控制。如实验人员需要对高压进行升降，而且可能有多种升降方式，如对某一高压插件进行升降，或是只对某一高压通道进行升降，又或者是对某一

高压机箱所有通道同时进行升降等。控制软件需要根据不同的硬件提供满足实验人员需要的操作功能。

3. 提供报警功能：及时提醒用户探测器的状态。
4. 数据存储：将从硬件采集到的数据存储到数据库中。

在探测器完成调试之后，本地控制软件中的一些功能却可以由用户选择是否开启，如：

1. 界面显示：所有的界面此时都不会有人来检查，所以任何界面的数据显示都是不必要的。
2. 报警功能：由于各个实验厅没有值班人员，所以报警功能也没有必要再显示出来。
3. 分布式管理需要正常运行，将完成本地控制软件与全局控制软件的所有通讯功能。
4. 数据采集及存储也需要正常运行。

2.1.2.4 数据库及查询

所有采集到的数据都要存储到数据库中，并提供 web 查询方式。控制系统需要根据大亚湾中微子实验的需求来设计数据库，并开发查询数据库的网页查询程序。本文作者根据大亚湾实验的需求设计了探测器控制系统的数据库。

网页服务器为用户提供查询数据库中数据的功能。可以在任何具有网络服务的地方通过这个网页服务器来查询大亚湾探测器控制系统存储在数据库中的数据。

2.1.3 大亚湾探测器控制系统的数据库

大亚湾探测器控制系统的数据库如图 8 所示。

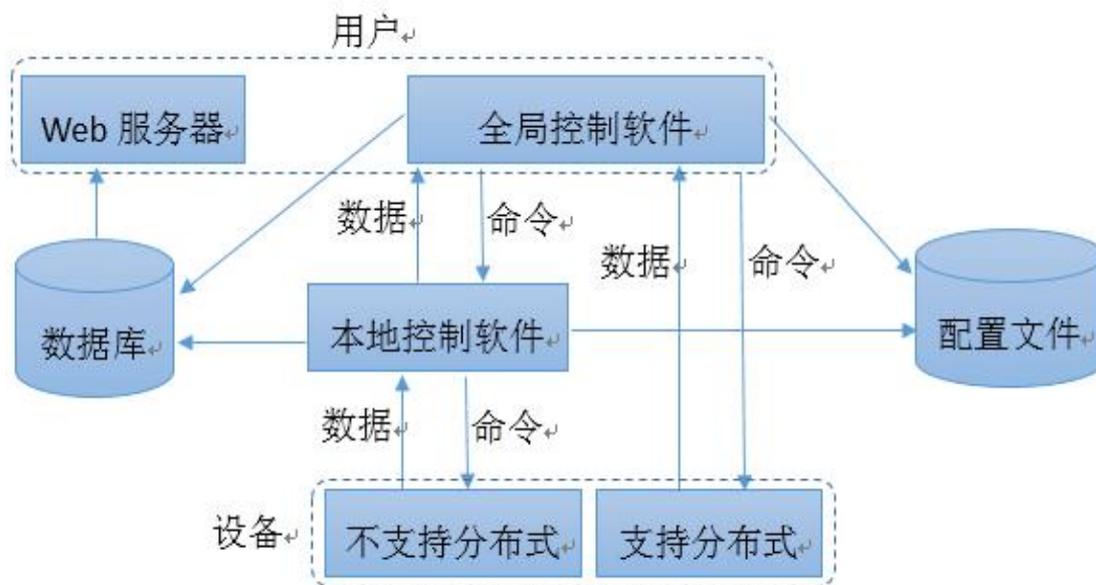


图 8 探测器控制系统数据流

探测器控制系统数据流可根据硬件不同分为两种，一种是硬件不能作为服务器的，它的数据需要通过本地控制软件进行采集，并由本地控制软件将这些数据转化为服务发布；然后全局控制软件作为客户端接收数据，并把命令发送给本地控制软件；再由本地控制软件将命令传到硬件设备完成对硬件的控制。另一种是在硬件设备上直接发布服务的情况，这时全局控制软件可以作为客户端直接从硬件设备取得数据，并将命令直接发送到硬件设备。

控制软件在采集到来自硬件设备的数据后，将数据存储到数据库服务器。

本地控制软件和全局控制软件相对应时，它们的配置信息是一致的，并由配置文件服务器进行管理，这种方式使配置信息的管理更加便捷，也使得两地的配置信息更加容易地保持在同一版本。

2.2 控制软件 SCADA 选用

2.2.1 控制软件数据采集与监视控制系统开发平台

数据采集与监视控制系统，即 Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA。

2.2.1.1 SCADA 开发平台介绍

在当今高能物理实验中，探测器控制系统的 SCADA 在开发平台选用上，存

在多种选择。作为欧洲高能物理实验的代表之一的 ATLAS，选用了西门子公司在全球范围内推出的针对广域/分布式 SCADA 系统的解决方案——PVSS 产品。基于 PVSS 开发的 ATLAS 探测器控制系统 SCADA，很好的解决了庞大的 ATLAS 探测器的需求，非常好的实现了重多数据的分布式管理。但是做为一款非常优秀成熟的商业产品，其价格也是十分高昂的。

而美国的高能物理实验 Hades，则选用了 EPICS 作为探测器控制系统 SCADA 的开发平台。EPICS 即实验物理及工业控制系统 (Experimental Physics and Industrial Control System)，是上世界 90 年代初由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 和阿贡国家实验室 (ANL) 等联合开发的大型控制软件系统。可以说 EPICS 是专门为物理实验开发的工业控制系统，在开发时充分考虑到了物理实验中探测器控制系统的各种需求，非常适合于探测器控制系统的开发。并且 EPICS 本身就是基于分布式标准开发，对高能物理实验中监测庞大的数据量实现分布式管理，具有非常大的优势。但是基于 EPICS 开发探测器控制系统要求开发人员对 EPICS 非常了解，而 EPICS 作为一款功能强大的软件，要掌握它并用来开发控制系统需要较多的时间来了解软件。而现在的一些工业硬件产品，还并没有统一提供对 EPICS 的支持，因此如果选用 EPICS 作为控制系统的 SCADA 开发平台，则可能需要开发相应的硬件驱动，而这必将需要大量的人力支持。

大亚湾的探测器控制系统有其自身的特点。首先作为一个国际合作实验，整个探测器控制系统的硬件部分由多个合作组成员采购或开发，并且需要提供与硬件的接口程序，即数据采集及控制部分。而这些合作组成员并没有开发数据采集与监视控制系统的经验，并且他们也不需要从此成为开发这种系统的专家，所以他们没有时间也没有必要去了解像 EPICS 这种非常专业的软件。

同时大亚湾实验探测器控制系统在整个实验建设中所获得的经费是有限的，所以也不太可能采购像 PVSS 这样功能强大、价格昂贵的商业产品。而相对于庞大的 ATLAS 探测器，大亚湾实验的探测器要小的多，所以也没有必要去采购像 PVSS 这样的商业产品。

而 LabVIEW 作为一款图形化的编程软件以及并不昂贵的价格非常适合于大亚湾探测器控制系统的开发平台。

2.2.1.2 SCADA 开发平台选用

LabVIEW 是一种图形化的程序开发环境，是美国国家仪器 (National Instrument, NI) 公司研制开发的。LabVIEW 与其他的计算机语言具有显著区别。其他计算机语言都是采用基于文本的语言产生代码，而 LabVIEW 使用的是图形

化编辑语言 G 编写程序，产生的程序是框图的形式[38]。图 9 中左侧部分为 LabVIEW 程序的前面板，其主要包含一些控件，这些控件类似 C 语言中的整数、布尔等数据类型。图 9 中右侧部分是 LabVIEW 程序的后面板，前面板的控件会以图标的方式显示在后面板；而算法的实现是通过数据流的方式来实现，即在不同控件之间通过连线来实现不同和算法。

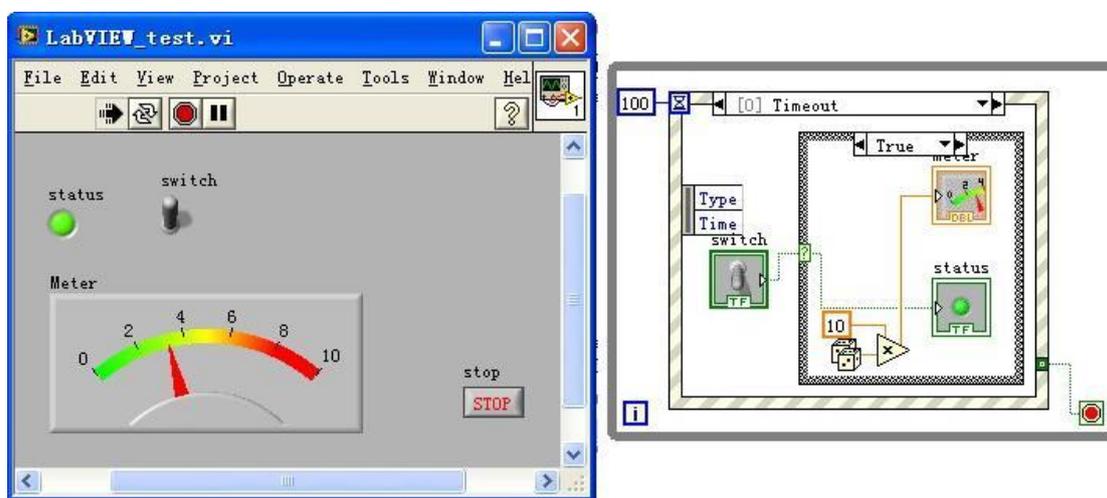


图 9 LabVIEW 程序框图

作为大亚湾探测器控制系统的 SCADA 开发平台, LabVIEW 具有如下优势:

1. 图形化的编程语言相比于基于文本的编程语言使得用户不需要去了解繁琐的语法，程序的结构设计也是非常清晰，不需要用户把大量时间花在考虑程序的结构设计上面。可以说 LabVIEW 就是专门为工程师开发的一种编程语言。对于大亚湾实验来说，合作组大部分人员都是物理学家，不具备专业的编程能力，因此 LabVIEW 是最合适的选择。
2. LabVIEW 内嵌了丰富的驱动工具及各种通讯协议的函数包，可以很轻松的连接具有通用接口的硬件设备，如 RS232、COM、TCP/IP 等。而大亚湾探测器控制系统的硬件层包含了很多种类的硬件，同时具有多种通讯协议，而 LabVIEW 在这方面的支持避免了实验人员对硬件驱动程序的开发。
3. LabVIEW 包含了重多与其它程序语言的接口，如通过动态链接库（DLL）、.NET、ActiveX、CIN 节点、MATLAB 脚本等技术，可以使 LabVIEW 轻松实现与其它热门语言的混合编程[39]。
4. LabVIEW 提供了强大的程序查错功能，如设置断点、指针、按步运行、高亮显示等，这些能帮助编程人员轻易的发现程序的逻辑错误，大大缩短程序的开发时间。

5. LabVIEW 包含了丰富的函数库，避免了用户为一些通用的功能进行重复开发，大大提高了程序的开发进度。

LabVIEW 本身具有共享变量，可以实现数据的分布式管理；可是对于大量数据点（3000 个以上）的支持并不理想，因此 LabVIEW 并不适合 Client/Server 方式的分布式架构[40]。而 DIM 正是基于 Client/Server 方式开发的，所以在数据管理方面我们选择了 DIM，来完成大亚湾探测器控制系统对数据的分布式管理的要求。

2.2.1.3 分布式数据管理

LabVIEW 本身提供了共享变量来实现局域网的数据传输，但是对于大量的数据支持不好，而且创建、管理都不方便。所以我引入 DIM (Distributed Information Management System) 来辅助实现探测器控制系统的分布式数据管理。

DIM 是一种分布式信息管理系统，由 CERN (西欧核子中心) 开发，基于 Client/Server 结构的通讯程序，并支持跨平台通讯，其所支持的操作系统包括：VMS, several Unix flavors (Linux, Solaris, HP-UX, Darwin, etc.) Windows and the real time OSs: OS9, LynxOs and VxWorks 等。

DIM 的 Client/Server 结构工作模式如图 10 所示[41]。

Service 是 DIM 中一个最基本的概念。一个 Service 包含了一套数据（任何类型及大小），每一个 Service 包含一个名字以区分于其它的 Service，而 Service 的名字并不会在 Service 中占据数据空间。Server 就是通过发布 Service 来将数据传送给 Client。

Server 把它要发布的 Service 注册到 Name Server。

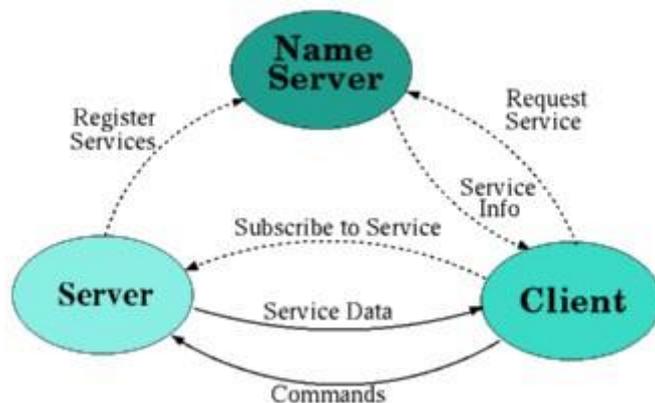


图 10 DIM Client/Server 工作模式

Client 则通过 Service 的名字去向 Name Server 申请 Service，返回信息中将包含发布这个 Service 的 Server 的信息；然后 Client 可以直接去向这个 Server“定阅”这个 Service。Client 在从 Server 得到 Service 数据的同时，还可以向 Server 发送命令。

Name Server 将会保持对 Server 和 Service 信息的更新。

这样的工作模式，使得 Server 对 Client 是透明的，即 Client 并不需要提前知道 Server 的信息。这种工作模式带来的另一个好处是，当一个 Server 甚至是 Name Server 崩溃之后，一旦它恢复到正常状态，整个系统的连接都会自动重新完成。同时，在这个系统中的任何一方要进行转移（从一台电脑到另一台电脑），也不会对其它方产生影响，它们可以自动恢复。

2.3 控制软件框架的设计与实现

控制软件包括了运行在实验厅的本地控制软件和运行在控制室的全局控制软件。并非所以监控系统都需要本地控制软件，只有硬件设备本身不支持分布式数据管理的监控系统才需要通过本地控制软件来辅助实现分布式数据管理。全局控制软件是为用户提供对探测器的监测及控制。

大探测器安装、调试期间，对于硬件设备的监控都需要在名个实验厅中进行。对于可以实现分布式数据管理的硬件设备来说，其监控软件在控制室运行和在实验厅中运行是没有区别的。而对于不能实现分布式数据管理的硬件设备来说，其本地控制软件与全局控制软件是不一样的，在设备调试期间需要通过本地控制软件进行监控。因此，本地控制软件与全局控制软件都要实现对设备的监控，满足实验人员的各种需求。

2.3.1 控制软件功能需求

实验人员需要通过控制系统掌握探测器的所有信息，并对探测器进行各种操作。因此，控制软件需要实现如下的功能：

1. 与硬件通讯：这一项功能主要是完成从硬件采集数据，以及向硬件发送控制命令；因此各控制系统，需要根据硬件及其通讯协议，设计不同的通讯模块。
2. 数据库相关功能：这一项功能包括了数据库中表的建立，以及将数据写到表中的功能。
3. 数据报警信息并存储到数据库：对从硬件读到的数据进行状态检查，对

异常数据及时报警，并在界面上显示；同时考虑到报警信息可能会在离线数据分析中用到，或者实验人员对探测器进行长期运行的状态进行检查，将报警信息存入数据库中。

4. 错误信息提示：主要处理软件中出现的各种错误信息，如硬件的错误状态信息，还有软件的一些错误信息，如连接数据库错误等。
5. 日志信息记录：将报警以及错误信息存储到日志文件，同样是为了方便查询。同时保存实验人员和值班人员对软件的操作信息。
6. 对硬件及各探头配置信息的管理：主要包括硬件的 IP 地址、端口号等信息，还包括与每一个数据对就的参数名的信息，甚至对一些具有复杂硬件连接信息的探测器，也保存这些连接信息，方便实验人员后期的查询。
7. 提供友好的用户界面：根据用户需求，提供足够的友好的用户界面，方便用户监测探测器状态，并方便的执行对探测器的操作。
8. 与全局控制软件进行通讯：这一部分是关系到整个探测器控制系统的的功能管理，是实现全局控制系统功能的重要基础。需要将采集到的硬件数据准确并及时地传送到全局控制系统，同时又可以接收来自全局控制软件的控制命令。

而本地控制软件与全局控制软件的分布式数据管理的功能要区别对待。其中，本地控制软件需要作为服务器把数据发布出来，而全局控制软件需要作为客户端去取得数据。由于本地控制软件和全局控制软件大部分功能一致，可以设计为同一框架，只需要区别对待分布式数据管理的功能。

2.3.2 控制软件的设计框架

由于控制系统需要为各个子系统提供统一的框架，为了使各个子系统整合到控制系统中时更方便，本地控制系统采用模块化设计；尽量将相近的功能放入一个模块中，同时把各模块之间的依赖性尽量降低，也就是高内聚、低耦合的模块化设计。

根据上面对控制系统的功能需求，控制系统的模块化设计框架如图 11 所示：

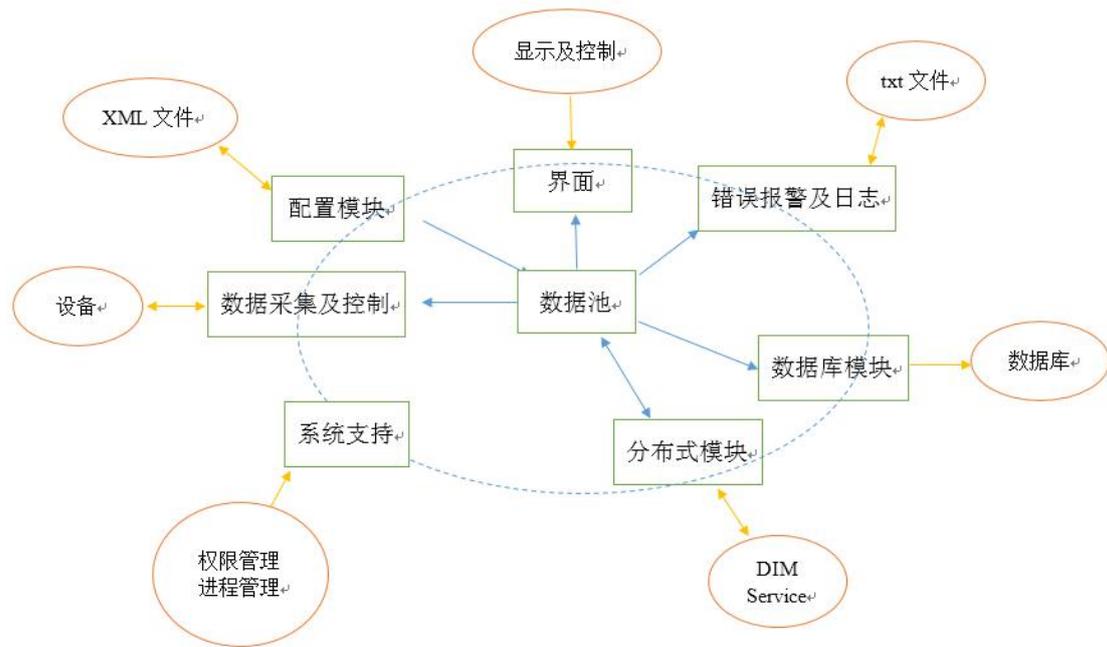


图 11 控制系统模块化设计框架

2.3.2.1 配置模块

这一模块主要功能包括：存储用户对硬件的配置信息；并在程序初使化时将这些信息调入，同时转化为数据采集模块、数据库模块等需要的信息；存储控制系统软件所需的配置信息，如数据库的 DSN、表名等。

在存储文件的类型选择方面，大亚湾的本地控制系统多种多样，硬件种类较多，配置信息数据类型丰富，甚至可能较为复杂。同时一些实验人员希望通过其它方式完成配置信息的修改。

LabVIEW 支持很多文件类型，包括：文本类型、表单文件（xls 文件）、二进制文件、数据记录文件、XML 文件、配置文件、波形文件、基于文本的测量文件、数据存储文件等。

XML（Extensible Markup Language，即可扩展标记语言）文件被选为配置信息文件的存储类型。首先 XML 文件可以存储 LabVIEW 中任意的数据类型；其次，XML 非常简单，且易于掌握和使用。

XML 的简单使其易于在任何应用程序中读写数据，这使 XML 很快成为数据交换的唯一公共语言，可以容易的在 Windows、Mac OS、Linux 以及其他平台下实现跨平台使用，可以很容易加载 XML 数据到程序中并分析他，并以 XML 格式输出结果。

在实际使用中，一些实验人员已经通过自己编写的程序，对配置文件进行了

修改，并将输出的文件放入本地控制系统中使用。可以说 XML 文件类型的使用便利了实验人员对配置信息的管理。

在配置信息中需要的信息包括硬件的相关信息，如 IP 地址、设备编号、端口号等，以及所监测物理量在数据库中的字段名 (field name)，其报警的上下限阈值，以及对每个物理量的描述信息。

在参数配置文件存储的同时，其文件名被存储在另一个 XML 文件中，如 configPath.xml；在软件启动时，默认使用此文件中包含的参数配置信息；同时这样的机制允许用户使用多套参数配置信息，用户可以直接载入不同的参数配置文件，然后将其文件名存储到 configPath.xml 文件中即可。

2.3.2.2 数据采集及控制模块

数据采集及控制模块中的第一部分，即数据采集部分，需要根据不同的硬件进行开发。在数据采集完成后将数据与配置信息中的其在数据库中的字段名进行一一对应，并将数据与其上下限阈值进行比较得到其状态信息，将这些信息一起放在一个簇中；所有的物理量将组成一个簇的数组。如图 12 所示：



图 12 物理量数据数组

其他模块如存储模块、报警处理模块等，可以直接使用此数组进行处理。

而控制部分的设计则需要考虑全局控制系统的需求。因为全局控制系统将通过 DIM Command Service 向本地控制系统发送命令，来实现对本地控制系统硬件的控制。因此如果本地控制系统的硬件控制部分是通过接收命令来实现对硬件的操作，则可以实现本地控制系统与全局控制系统的无缝链接。整个控制部分实现如图 13 所示：

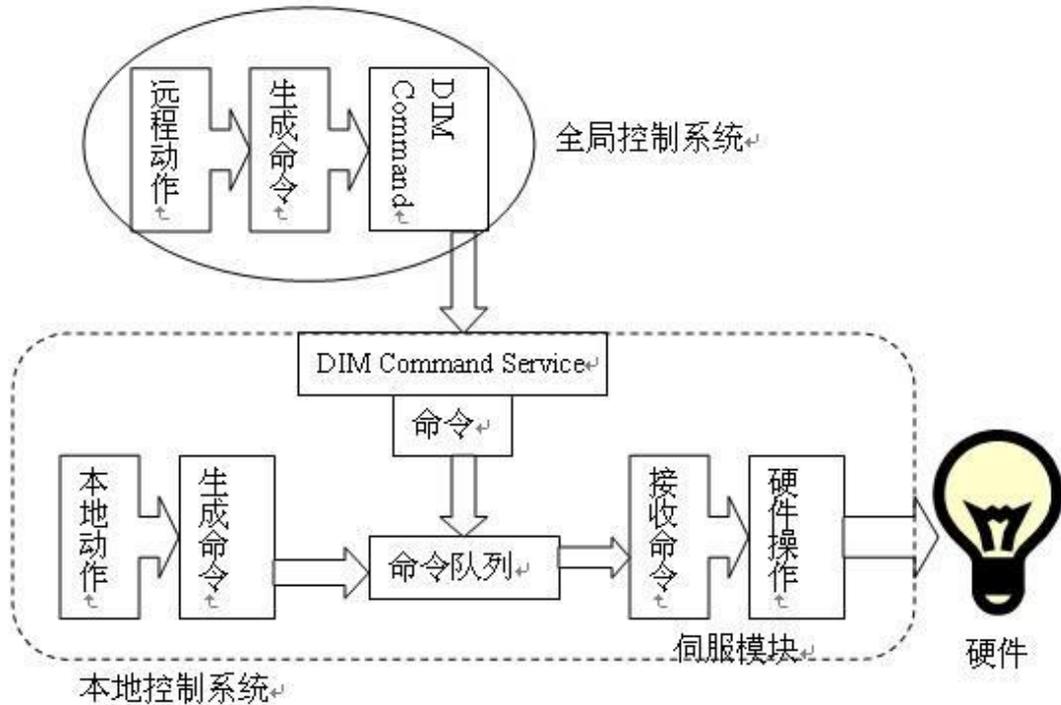


图 13 控制部分实现框图

虚线框中为本地系统的相关控制部分，其控制硬件流程为：由本地动作触发事件生成控制命令，并将命令写入到一个队列中；伺服模块从队列中读取命令，然后对硬件进行操作。

实线椭圆框中部分为全局控制系统中的控制部分，其控制硬件流程为：将用户产生的动作转化为相应的命令，通过 DIM Command Client (DIM 命令客户端) 将命令发送给本地系统的 DIM Command Service (DIM 命令服务端)，然后 DIM Command Service 将所收到的 DIM Command 转化为对应硬件的操作命令，并将其写前面所述的队列中，然后再交给本地控制系统的伺服模块对硬件进行操作。

将操作动作转化为命令的程序框图，如图 14 所示：

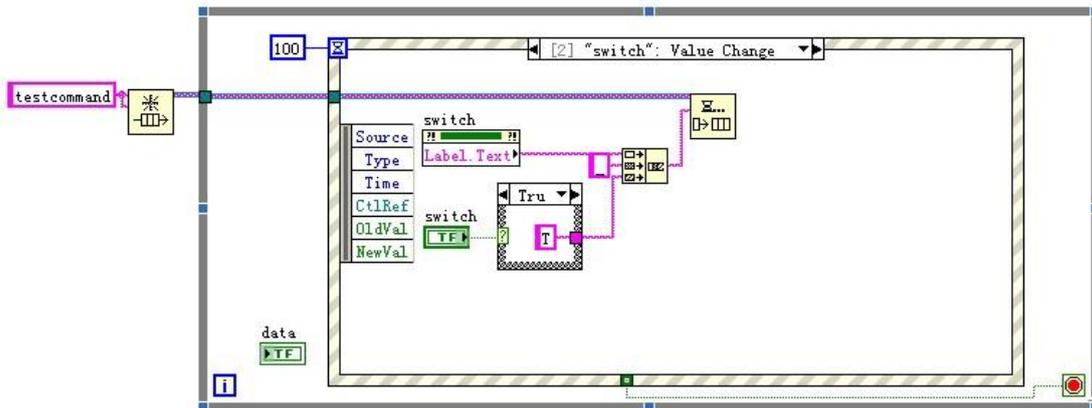


图 14 操作转化为命令程序框图

每一个动作通过触发事件，把按照一定格式生成的命令加入到队列 testcommand 中。

而通过读取队列 testcommand 中的命令来完成对硬件的操作的实现框图如图 15 所示：

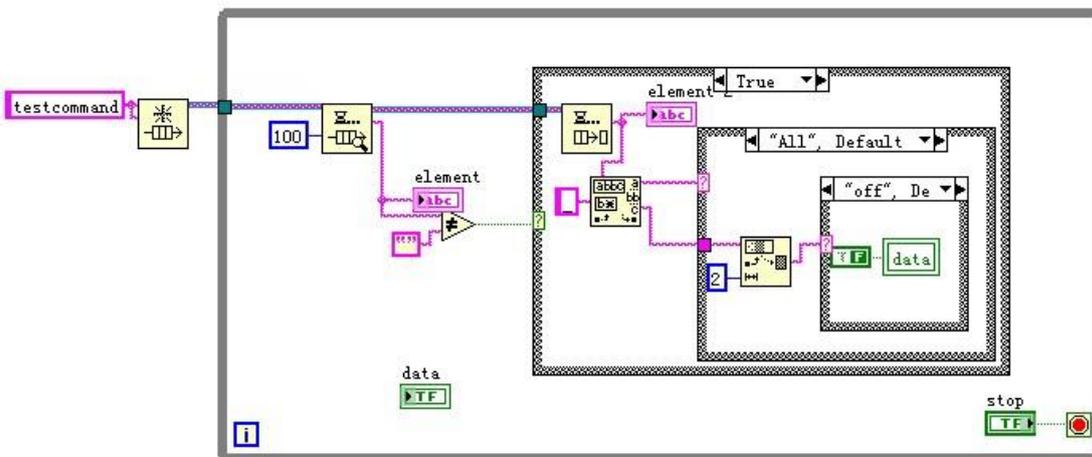


图 15 通过读取命令实现操作程序框图

这一段程序将在后台伺服执行，一旦队列 testcommand 中出现命令，这段程序就会解释这个命令并做出相应的操作。

2.3.2.3 数据库模块

2.3.2.3.1 数据库模块设计

在数据库的选择上，相对于 Oracle, Microsoft SQL Server, SYBASE ASE 都需要支付高昂的价格外，MySQL 数据库作为一款开放源码的软件，提供了免费

的版本，大大降低了使用成本。MySQL 最初由瑞典 MySQLAB 公司开发，其具有以下特性[42]：

1. 支持多种操作系统，如：Linux, Mac OS, Windows, FreeBSD 等。
2. 为多种编程语言提供了 API，如：C/C++, Python, Java, PHP, Perl 等。
3. 提供 TCP/IP, ODBC, JDBC 等多种数据库连接途径。
4. 可以处理上千万条记录的大型数据库。

在确定使用 MySQL 数据库后，数据库模块的数据流程采用如图 16 所示设计：

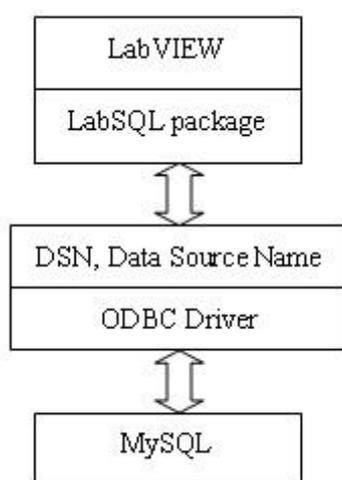


图 16 数据库模块数据流

与 MySQL 的连接选择了 ODBC Driver。ODBC (Open Database Connectivity, 开放数据库互连) 是微软公司开放服务结构中关于数据库的一个组成部分[43]，它建立了一组规范，提供了一组标准的数据库访问 API (Application Programming Interface, 应用程序编程接口)。

通过 DSN (数据源名称) 实现 ODBC 与应用程序的连接。通过配置 DSN，上层应用程序可以直接通过 DSN 的名字来实现与 ODBC 的连接。

在应用程序中选用了 LabSQL 程序包。LabSQL 是由 Premkc Development 公司的 Chris Roth 和 Jeffrey Travis 开发的连接数据库程序包[44]，并免费为用户提供使用。LabSQL 基于 Microsoft ADO 对象和 SQL 语言完成数据库访问，将复杂的 ADO 和 SQL 操作封装在一系列的 VI 中，方便了用户的使用。

2.3.2.3.2 数据库的设计

1. 需求分析

大亚湾实验中监测的物理量的数据类型包括：

短整型（short integer），如 VME 机箱监控中的 Power Status 等，其在数据库中长度为 1 个字节；

整型（integer），如 VME 机箱监控中的风扇转速、温度等，其在数据库中长度为两个字节；

长整型（int32），如 AD 端盖监测系统中的 SensorStatus、Capacitance_GdLS 等，在数据库的长度为 4 个字节；

单精度类型（float），如高压监控系统中的电压、电流值等，在数据库的长度为 4 个字节；

字符串类型（varchar），存储参数名、表名、参数的描述信息等，根据具体需要确定其长度。

同时，需要提供用户通过网页查询数据及下载数据的功能。

2. 概念设计

对用户描述的现实世界进行分类、聚集和概括，最终建立抽象的概念数据模型。主要通过两个步骤来实现。第一步明确现实世界各部门所包含的各种实体及其属性、实体间的联系等，给出各部门所用信息的局部描述；第二步将得到的局部描述集成为一个全局视图，即用户要描述的现实世界的概念数据模型[45]。

大亚湾实验，主要探测器分布在数个实验厅中，如：大亚湾近厅（DBNS）、岭澳近厅（LANS）、远厅（FARS）、液闪厅（LSH）等；

而在每个实验厅又包含一些主系统（Main System），如：AD1、RPC、IWP、OWP 等；

每一个主系统又包含了一些子系统（Sub System），如 AD1 主系统下包含：高压机箱电源、VME 机箱、温度监控系统、端盖监测系统、刻度系统等子系统；

而子系统下也可能包含多个实体，如高压监控系统下包含：电压（VMON）、电流（IMON）、开关状态（Power Status）、温度等。

因此，大亚湾实验的数据模型是树形结构。其中每一个叶子结点对应为一个实体。以大亚湾实验中 AD 探测器高压监控系统包含的相关实体及其属性为例，如图 17 所示：

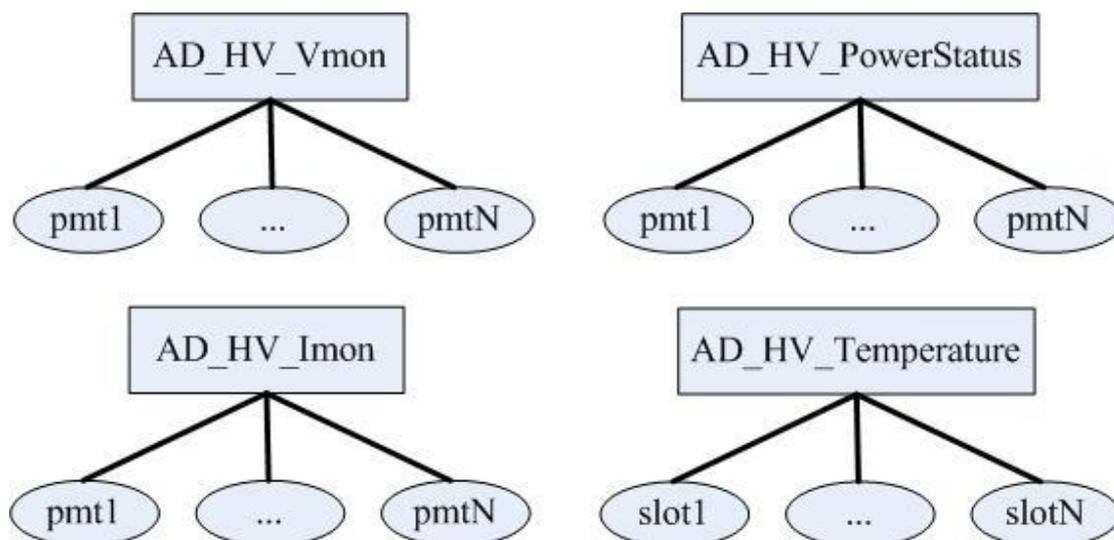


图 17 AD 探测器高压监控系统相关实体及其属性

AD_HV_Vmon 是 AD 高压监控的系统中的通道电压,属性为各路高压的 pmt 编号;

AD_HV_Imon 是 AD 高压监控的系统中的通道电流,属性为各路高压的 pmt 编号;

AD_HV_POWPerStatus 是 AD 高压监控的系统中的通道开关状态,属性为各路高压的 pmt 编号;

AD_HV_Temperature 是 AD 高压监控的系统中的插件温度,属性为各插件的编号;

3. 逻辑设计

大亚湾探测器控制系统数据库的逻辑结构如图 18 所示。其中结构表用来存储物理量的位置信息,通过这些信息可以定位每个物理量被存储在哪个数据表中。而数据表用来存储物理量的数据信息。

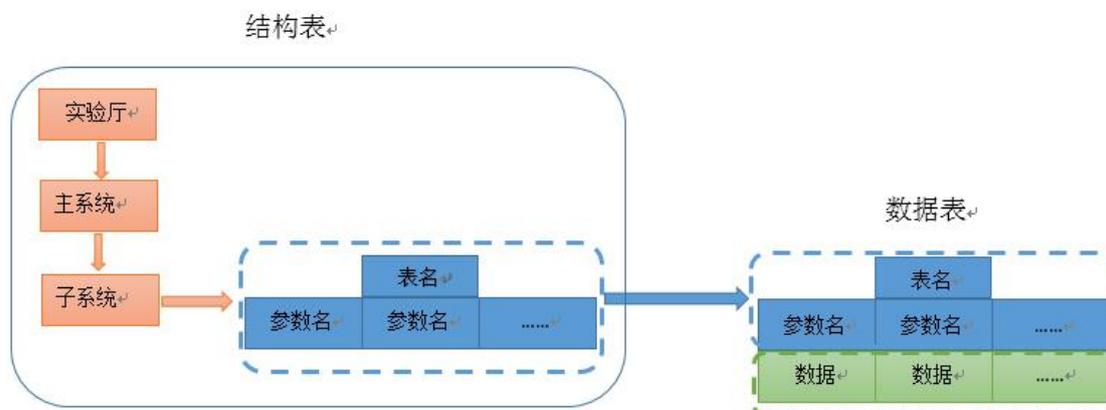


图 18 数据库逻辑结构

数据表的设计：主要包含两种思路，即每一个数据作为表中的一行信息，如表 2 所示；每一组数据作为表中的一行信息，如表 3 所示。

采用一个数据插入一行的格式，则数据表非常灵活，存储到表中的参数可以任意增加或减少，而且所有数据在表中可以采用同一格式。但是带来的问题是，由于数据冗余，占用数据库的容量将会成倍增加。而且网络占用量同时也会成倍增。

如果采用把从数据采集系统采集的一组数据作为一行信息插入到数据表中，那么当一个表建好之后，如果以后又希望增加一列元素，当表中记录数非常大的时候，这种增加列元素的响应将会非常耗时，也就是失去了表的灵活性。但同时却大大减少了数据的冗余，降低了网络资源的占用。

表 2 数据表格式——单数据

id	Date time	Parameter name
1	Time 1	Value 1
2	Time 1	Value 2
...

表 3 数据表格式——组数据

id	Data time	Parameter name 1	Parameter name 2	Parameter name 3	...
1	Time 1	Value 1	Value 2	Value 3	...
2	Time 2	Value 1	Value 2	Value 3	...
...

考虑到大亚湾实验各探测器建成之后，探测器控制系统中物理量因此数据表的格式选用了同时插入一组数据的格式。

结构表的设计，需要在表中将每一个叶子结点的属性的相关信息存储到数据库中。为了查询方便，将与数据项相关的信息全部放入一个表中，如表所 4 示：

表 4 结构表

parameter	Table	Site	Mainsytem	Subsystem	Reference	Description
-----------	-------	------	-----------	-----------	-----------	-------------

其中 parameter 和 table 为键。这样的设计虽然会有冗余，但考虑到大亚湾实验中探测器控制系统所有监控的数据量只有 8000 多个，冗余影响并不大；而且查询时只访问这一个表就可以知道探测器控制系统的所有的物理量，简化了查询过程。

2.3.2.4 错误、报警、日志模块

此模块的主要功能就是对产生的相应信息进行处理、显示、存储、查询等。

1. 错误信息主要是软件与硬件的连接出错信息，以及软件中写数据库，读写文件所产生的错误信息。如表 5 中所示：

表 5 错误信息

Date time	Error code	Error source
-----------	------------	--------------

错误信息由错误发生时间、错误码、以及错误信息组成。

错误信息功能实现如下：

处理：在错误信息产生的地方，将错误信息放入一个全局变量数组中，其他的功能即基于此数组完成；

显示、存储：在每一个读数循环中，检查错误信息数组，将错误信息存入文件、显示在主界面上、并清空此数组。

整个功能实现的流程如图 19 所示：

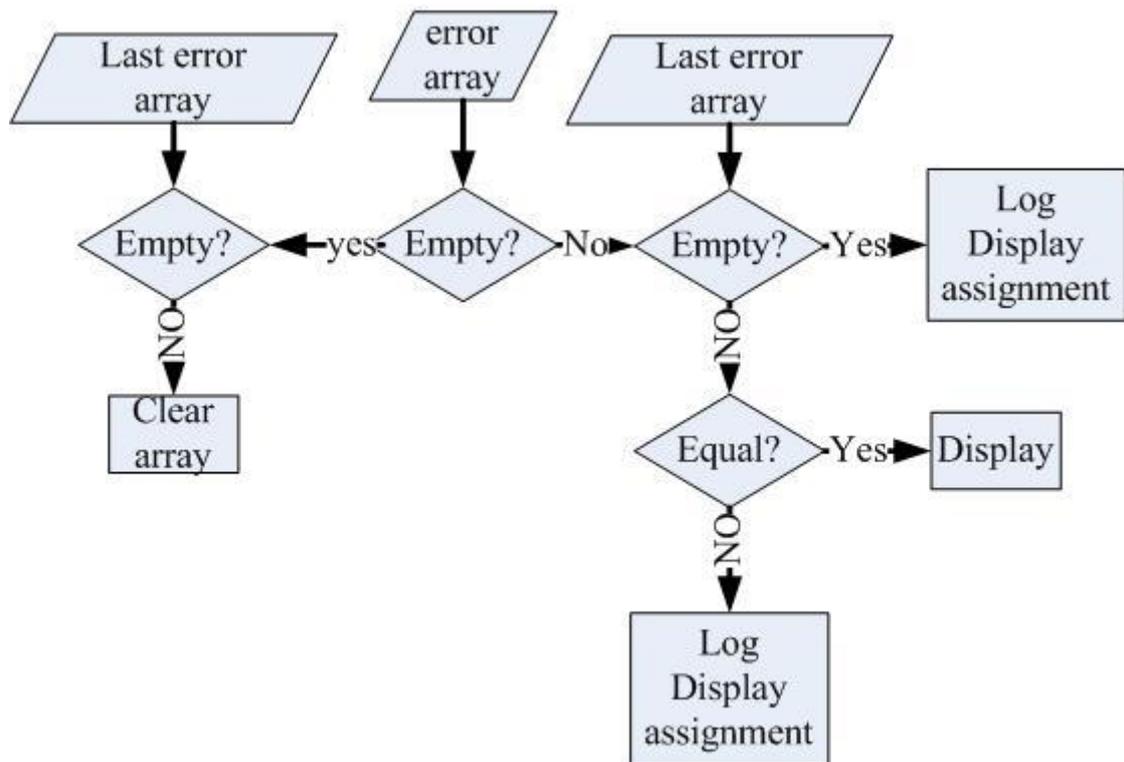


图 19 错误处理流程

2. 报警部分主要功能是对从硬件采集到的数据与配置信息中的该参数的正常范围进行对比，并做出报警提示。报警信息包含内容如表 6 所示：

表 6 高压报警信息

Date time	parameter	value	Alarm status	Crate	Slot	channel
-----------	-----------	-------	--------------	-------	------	---------

报警信息由报警发生时间、发生此报警的参数名和它的数值、报警类型、所在高压机箱、插件通道号、以及高压通道组成。由于硬件不同，各本地控制系统的报警信息会有所不同。

报警信息的处理分为自动处理和手动处理两部分，自动处理部分流程与错误信息处理部分基本一致。而手动处理部分，则需要实验人员参与处理，其机制如下：当有新的报警信息时，在报警窗口显示并记录到日志；实验人员对其进行确认；确认后报警信息不再产生，清空报警窗口，如报警信息继续产生，则保留报警窗口显示信息。

3. 日志部分主要记录软件的启动终止，以及用户对软件的操作信息。可以帮助用户查询软件在何时被哪个用户进行了什么操作。其所包含信息如下表所示：

表 7 日志信息

Date time	User	action
-----------	------	--------

日志主要包含信息有：时间、用户、事件。

4. 信息存储与查询

信息存储路径为：报警信息日志，Project/RunLog/AlarmLog；

错误信息日志，Project/RunLog/ErrorLog；

事件信息日志，Project/RunLog/EventLog。

在程序首次运行时会自动检查这些路径是否存在，如不存在 CreatRunLog.vi 会自动生成这些路径，其程序框图如图 20 所示：

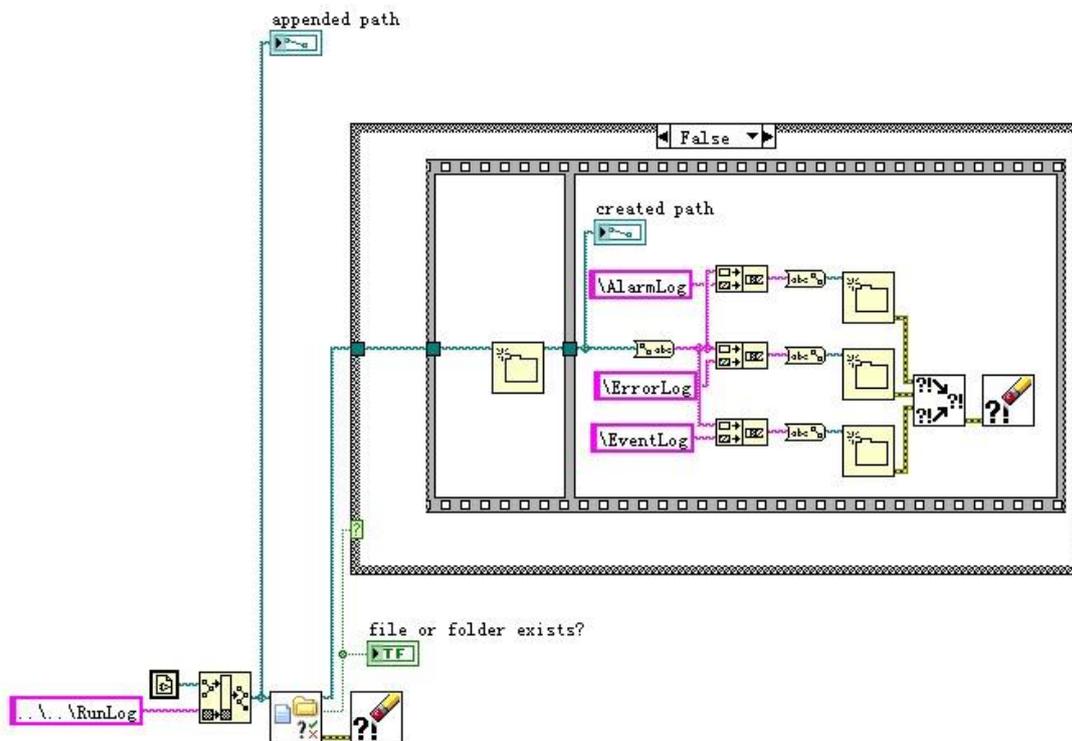


图 20 自动创建日志路径 VI 框图

2.3.2.5 系统支持模块

系统支持模块主要功能为帮助主程序实现对整个本地控制系统所有 VI 的调用及控制，包括以下几个主要部分。

初使化部分：读入参数配置信息，系统配置信息等，并将其转化为其它 VI 所需要的格式，放入相应全局变量中。对某些全局变量进行初使化，如将控制

所有 VI 退出的变量设为 False。

调用子 VI 部分：由于主程序通过调用各个模块中的 VI，以实现本地控制系统全部功能。为了调用方便，将与调用子 VI 相关的功能集成到几个 VI 中。

权限管理部分：对软件的使用权限进行控制，采用三级权限控制：

1. 管理员：拥有软件的最高权限，通常对应探测器控制组管理员，可以对软件的进行系统配置，包括数据库的相关信息、软件运行模式等；
2. 专家：可以对软件进行参数配置等，如报警上下限、物理量名称、硬件地址等信息；
3. 值班员：可以对数据进行查询、监测、以及允许的控制功能。

其实现分为两部分：登录及控制。

1. 登录部分，用户利用相应帐号登录到软件中，软件会记录其帐号。
2. 控制部分，软件判断当前帐号权限，开放其允许的功能。

2.3.2.6 界面

主要包含一些显示界面的设计。比如在一个温度监测软件中，可能会接收来自多个前端电子学板的数据，而每个电子学板中的数据来自不同的探测器，所以在显示的时候就需要分成多个面板显示。这时就要开发多个显示界面，然后在主程序中调用这些界面显示相应信息。这个模块是需要根据不同系统进行单独开发的。

2.3.2.7 分布式模块

分布式模块是本地控制软件与全局控制软件的桥梁，这一模块的设计与实现直接关系到整个探测器控制系统分布式数据管理的实现。

本地控制软件的分布式模块需要实现的两个功能是，将采集到的硬件数据发布为 DIM Service，同时接收来自全局控制系统的命令。

1. 发布数据 DIM Service 的程序框图如图 21 所示：

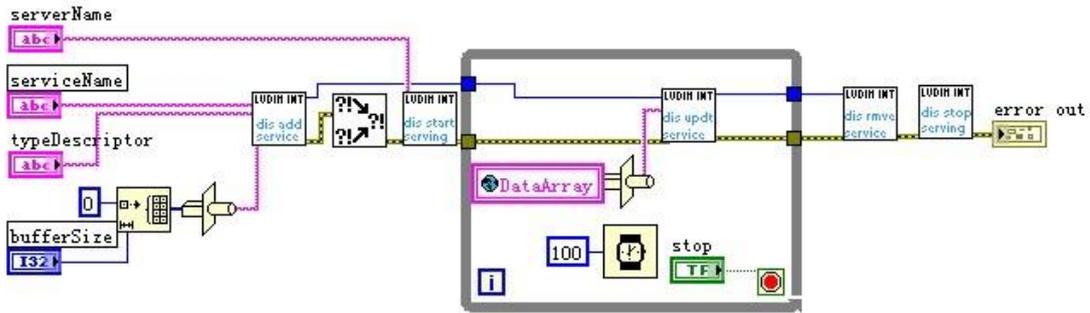


图 21 DIM Service 发布程序框图

Server Name 每台电脑使用一个名字，可由用户任意使用；Service Name 每个 Service 需要不同的名字；type descriptor 是对发布的数据的类型描述，如，F:16，表示 16 个 float 型数据；buffer Size 是发布数据的长度，指字节数。Data Array 是这个 Service 需要发布的数据值。

Server Name 命名采用计算机名。

Service Name 命名格式为 SITE_Detector_Subsystem，如 DBNS_AD1_HV。

2. 发布 DIM Command Service 的程序流程图如图 22 所示：

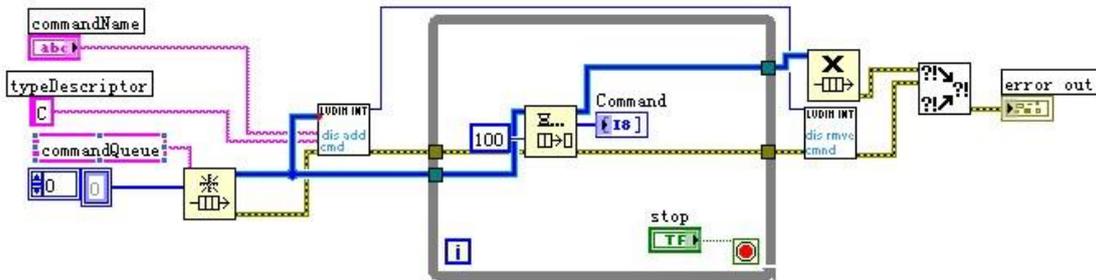


图 22 DIM Command Service 程序框图

Server 端接收 Client 端的命令，实际是由 Server 端发布的 DIM Command Service 来实现的。Command Name 指 Command Service 的名字；type Descriptor 指 Command 的数据类型，如，‘C’ 指字符串；然后 command Queue 会自动更新来自 Client 端的命令，只是 Command 的类型一律被转化为 byte 类型的数组。

Command Service Name 命名格式为 SITE_Detector_Subsystem_command，如，DBNS_AD1_HV_command。

3. 发布错误信息服务：由于本地控制系统中的错误信息包含一些重要的提示，如硬件的连接状态等，在全局控制系统中需要知道这些硬件的状态，

就要在本地控制系统中将错误信息发布为 DIM Service。其发布程序与发布数据服务基本一致。

Service Name 命名格式为：SITE_Detector_Subsystem_error，如：DBNS_AD1_HV_error。

而全局控制软件的分布式模块则是作为 DIM Client 接收相应 DIM Service 的数据来实现对硬件设备的监控，同时可以向 DIM Service 传送命令。

2.3.2.8 主程序

主程序负责整个本地控制系统的运行。在数据读取的同时，需要将数据存储到数据库，以及将数据发布为 DIM Service，因此主程序需要采用多线程处理。其流程图如图 23 所示：

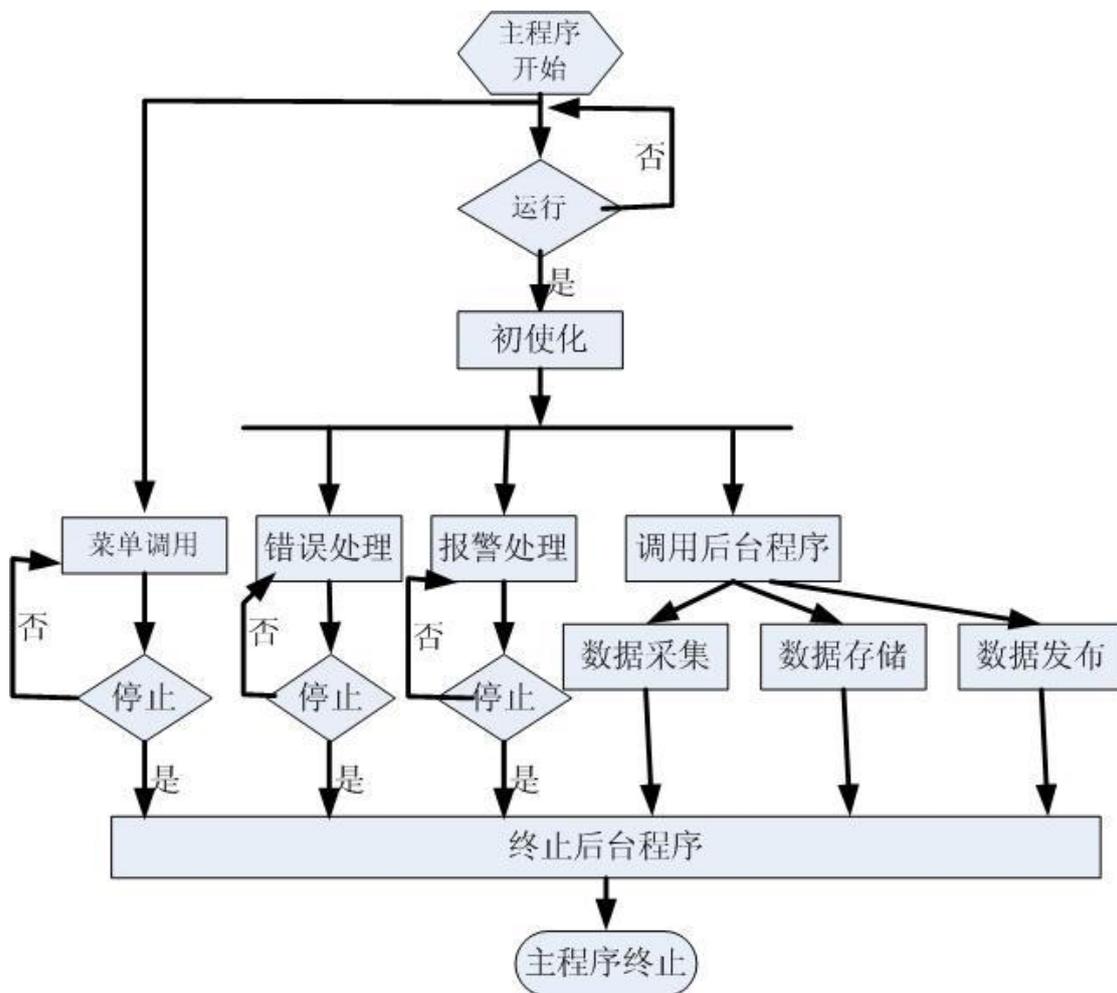


图 23 主程序流程图

1. 主程序开始后，首先进入菜单调用循环，允许用户通过菜单调用参数配置界面，来对硬件参数进行配置。
2. 在用户配置完成或者用户不需要配置时，可进行下一个进程初使化，初使化是通过载入配置文件，读取配置信息，提供硬件的连接信息以及数据库中 DSN、表名、参数名等信息。
3. 初使化完成后，通过调用后台程序进程，来调用数据采集模块数据存储模块、数据发布 DIM Service 模块等。
4. 同时，错误处理、报警处理循环开始工作。
5. 在接到停止命令后，菜单调用、错误处理、报警处理停止工作，同时终止后台程序。
6. 主程序终止。

2.3.2.9 数据池

数据池是整个软件框架的数据流核心。配置信息在初使化后会进入数据池，其他模块从数据池中取得自己所需要的信息，如数据采集及控制模块会从数据池中取得硬件设备的相关信息。而数据采集及控制模块从硬件采集到的数据也会放入数据池，数据库模块则从数据池中取得监测数据并存入到数据库中。同时，对 VI 的控制也用到了数据池中的一些数据，如软件关闭时及是通过主程序将数据池中的全局变量“STOP”赋值为“TRUE”来控制一些 VI 的关闭。

2.4 控制系统的设计与实现

我主要完成了以下探测器控制系统的软件开发：高压监控系统、VME 机箱监控系统、基于 DIM 的监控系统（温度监控系统、低压电源监控系统等）、AD 端盖监测系统、Radon 监控系统等。其中 AD 端盖监测系统和 Radon 监控系统的硬件系统由合作组中其他成员开发，并提供了数据采集模块，我将此模块整合到了探测器控制系统的软件框架中，提供了探测器控制系统统一的功能。

控制系统的设计与实现将主要介绍各子系统数据采集模块、配置模块、数据库模块等的设计，因此其他模块的功能是基本一致的，通过微小的改动就可以在不同的控制系统之间移植。

2.4.1 高压监控系统

大亚湾实验的高压机箱使用的是 CAEN 的 SY1527。其机箱如图 24 所示：



图 24 CAEN 高压机箱 SY1527

高压监控系统主要为 AD 和水池中的 PMT，以及 RPC 提供高压电源。其中为 PMT 提供高压电源的插件为 A1932，而为 RPC 提供正负高压电源的插件为 A1733P 和 A1733N。由于插件的不同两者的程序的一些模块需要单独开发。

高压机箱支持 TCP/IP 协议，支持分布式数据管理，可以基于此协议直接开发全局控制软件。

2.4.1.1 PMT 的高压监控系统

2.4.1.1.1 需求分析

高压插件采用 A1932。每个 A1932 插件含有一路 Primary channel，以及 48 路输出高压，并且这 48 路高压被分成 6 组，每一组的高压会一起被开启或关闭，因此我们只能按照组来升降高压，而不能对一个通道进行单独升降。Primary channel 并不向外部提供电源，实际上 48 路输出高压是从这一路高压分出来的，而且只有这一路高压提供了电压和电流值的读写权限，其它 48 路高压只能读出电压值。同时 48 路高压输出的电压值将受到 Primary channel 的影响，即 48 路高压输出的电压值只能比 Primary channel 的值低 100 伏到 900 伏。

实验人员要求实现的功能包括：

1. 设置：硬件地址、高压值、插件温度阈值、Primary channel 的电流阈值、正常电压阈值、高压是否使用等信息；
2. 操作：调试阶段按组升降高压；实验阶段整体升降高压；

2.4.1.1.2 配置模块

1. 高压参数配置：

根据高压机箱的硬件结构，PMT 高压监控软件的配置信息如图 25 所示：

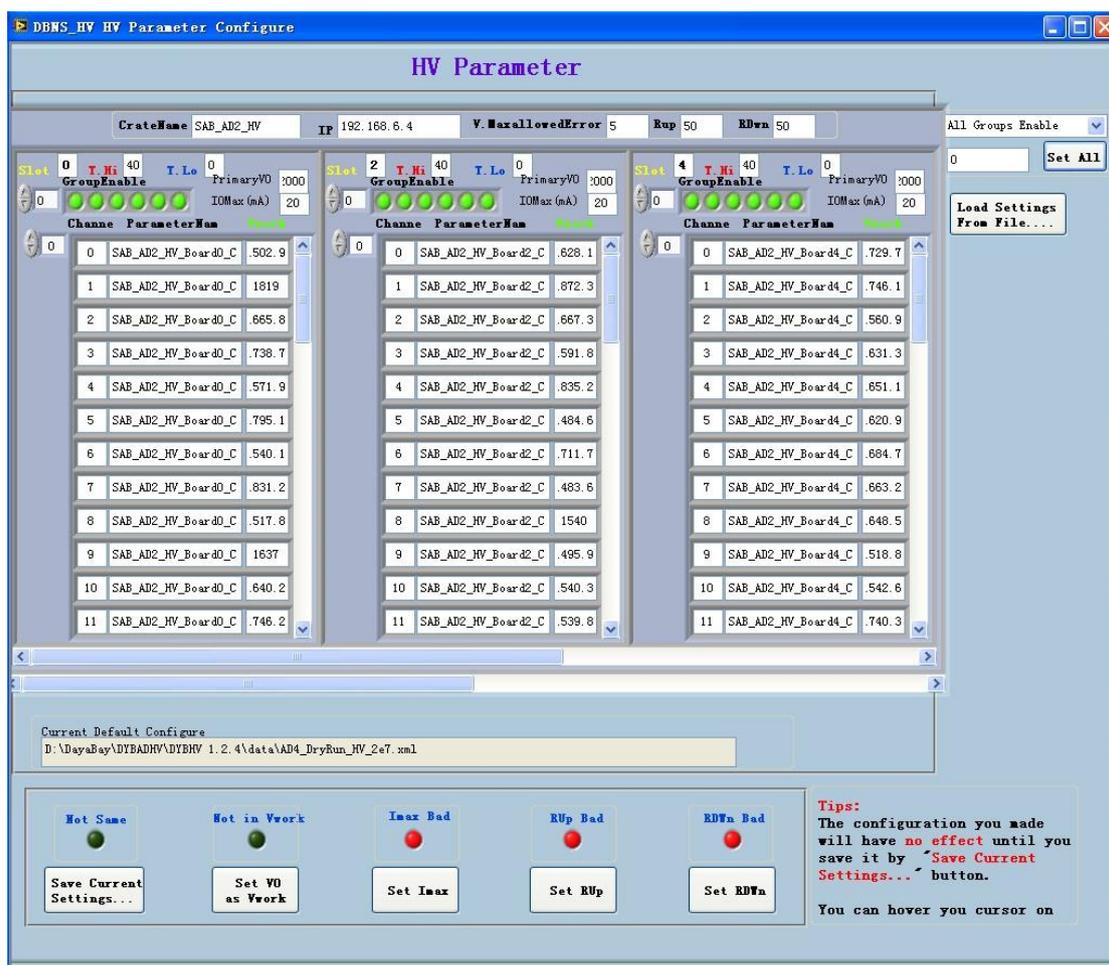


图 25 PMT 高压的配置信息

为了使高压软件可以监控多个机箱，配置信息的数据结构为以机箱为元素的数组。而每个机箱包含了其硬件信息，如机箱名、IP 地址等；同时含了多个插件，因此以插件为元素组成一个数组。每个插件也包含一些公共的信息，如：插槽号、温度上下限阈值、primary 高压通道设置等；同时每个插件又包含了 48 路输出电压，其又组成了一个数组。每路高压包含三个信息，通道号是其在插件上的硬件地址；参数名是其软件中的标识以及在数据库中的标识；高压值是设置的此通道的输出高压。

配置模块提供了如下操作功能：

在配置完成这些信息后，用户需要点击下面的按钮“Save Current Settings...”，会出现图 26 中的提示框，在选择保存路径和文件名后，点击“OK”按钮完成配置信息被存储到用户选择的路径，同时此路径被存储到 configPath.xml 文件中，此配置信息成为软件的默认配置信息。

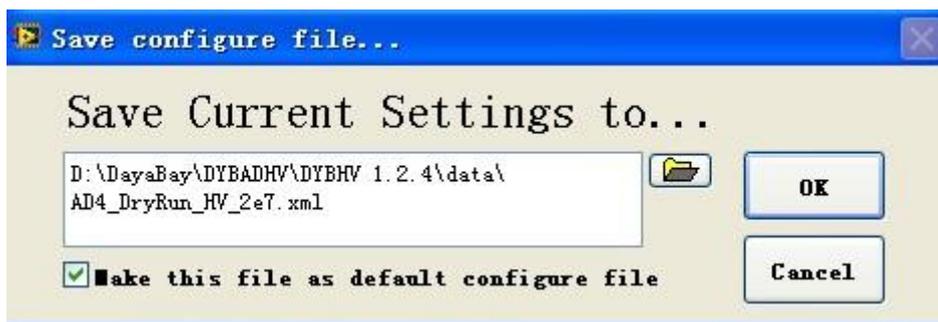


图 26 配置信息存储提示框

“Set V0 as Vwork”，“Set Imax”，“Set Rup”，“Set Rdwn”分别将高压值，Primary channel 的电流值，电压的升降速度写到高压机箱中。在完成这些操作之后，用户的配置信息才会起作用。

同时，用户可以选择将以前配置文件信息设置为默认配置信息。

“Set All”按钮为用户提供了一些小工具使配置更加方便。

2. 高压 Map 配置：

同时 PMT 高压的并不是由插件直接引出电源线连接到 PMT 上，而是先把插件上的输出高压连接到一个 Decoupler 上面，然后再从 Decoupler 上引出电源线接到 PMT 上。Map 配置将每一路高压与 Decoupler 编号及 PMT 编号的对应关系信息存储到 Map 配置文件中。

通过 Map 配置文件，实验人员可以在每一路高压任一环节出现问题时，查询到此路高压对应的其它信息，从而帮助实验人员尽快解决问题。

2.4.1.1.3 数据采集及控制模块

数据采集及控制模块基于 CAEN 提供的 CAENHVWrapper.dll 开发。在 LabVIEW 中对其的使用如图 27 所示：

System Name 是高压机箱的名字，slot 是机箱中插槽的编号，ChNum 是需要进行操作的高压通道的数量，ChList 是这些高压通道在插件中的通道编号，ParVal 是高压通道所要改变到的值。而 ParName 代表对高压通道进行何种操作，包括如下操作：

V0set: 设置高压值，

I0set: 设定 Primary channel 的最大电流值，

Vmon: 读取高压值，

Imon: 读取电流值，

RUp: 设定升高压的速度，伏每秒，
 RDWn: 设定降低压的速度，伏每秒，
 Pw: 对高压进行升降。

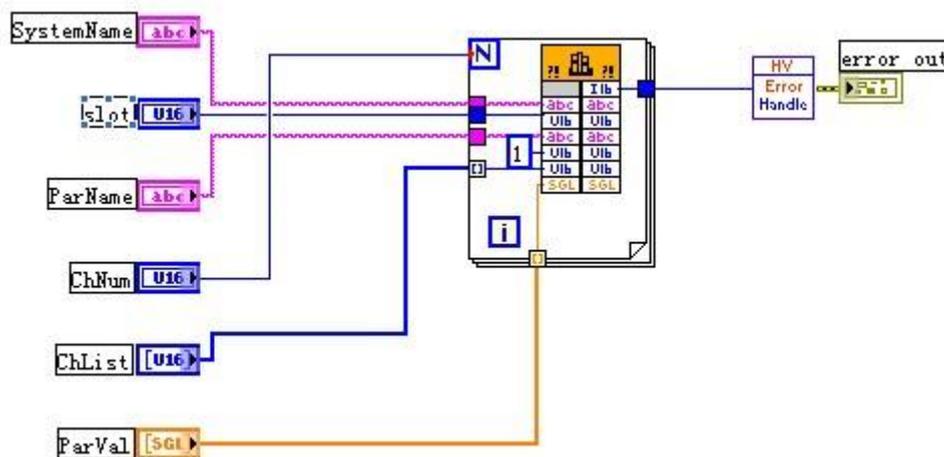


图 27 CAENHV Wrapper 的使用

高压的机箱的通讯协议是 TCP/IP, 基于此协议开发的数据采集与控制模块直接实现了数据的分布式管理, 其控制系统是可以直接在控制室运行并对高压机箱实现监控的。

2.4.1.1.4 数据库表的设计

高压监控程序需要监控的高压机箱的 4 种物理量, 分别是: 电压、电流、温度、开关状态。其中电压和开关状态对应每一路高压, 而电流和温度对应每一个插件。为了避免冗余, 以及查询方便, 在数据库中为每一种物理量创建了一个表。

上述几个物理量均为单精度 (float) 类型。在 Mysql 数据库中处理单精度类型有一个问题, 当数值小数部分为 0 时, 如 1500.0, 那么在数据库中这个数值会被以整数 1500 来存储。而在 Mysql 数据库中 decimal 数据类型解决了这个问题。如 DECIMAL(M,D), M 代表十进制数字的数目, D 代表小数点后的数字位数。

考虑到插件提供的最大电压值为 3000V, 分辨率为 0.2V; 每个插件的电大电流值为 30mA, 分辨率为 0.02mA, 所以将其类型设置为 DECIMAL(6,2), 数值范围为: -9999.99 到 9999.99。

考虑到温度的精度需求, DECIMAL(4,2), 数值范围为: -99.99 到 99.99 即可满足其需求。

而开关状态为布尔（Boolean）类型，在 Mysql 数据库中实际上是按照 TINYINT 整数类型存储，其数值范围为：-128 到 127。

2.4.1.1.5 PMT 高压主界面

1. 其主界面如图 28 所示：

其中左上角的红色矩形框内是菜单栏，用户可以通过点击菜单项打开其它界面，如配置界面，控制高压界面等。

下面较大的矩形框中是一个插件的监测数据，在矩形框的上方是这个插件在机箱中的位置，其名字格式为：**CrateName.SlotXX**，即高压机箱名以及其所在机箱中的插槽编号。然后是显示插件温度和整个插件电流的两个数值。剩下的是 48 路高压的状态，共有 6 组数据，每组包含 8 路高压；每路高压显示了此路高压连接的 PMT 的名字、高压的状态和高压的值。

在右侧椭圆框中的几个按钮是对高压的控制动作，“Pw UP to Vwork”是将高压升到工作高压，“PW OFF”是关高压，“Clear Trip Alarm”是清除高压的 Trip Alarm 状态，“Kill”是最快速的关闭高压机箱。

椭圆框下面的两个按钮，上面一个是“Reset”，点击后程序会重新连接高压机箱；下面一个是“Stop”，点击后整个程序退出。

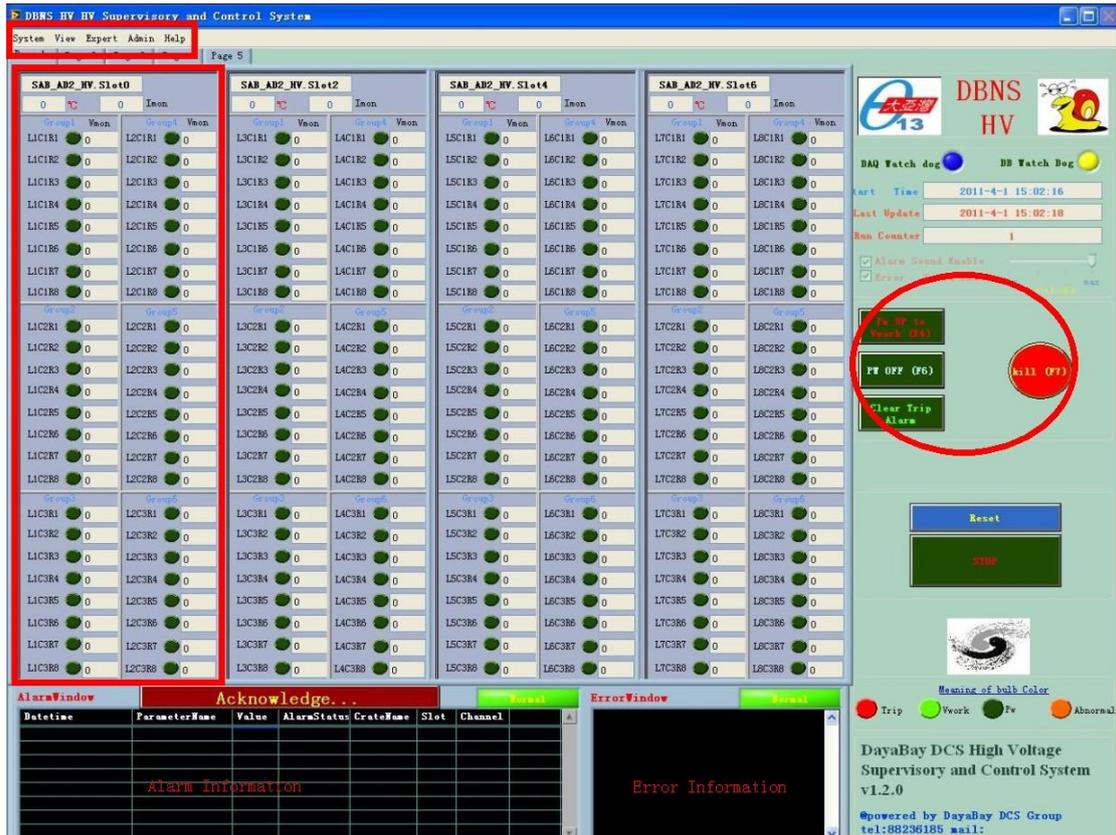


图 28 PMT 高压监控程序主界面

其中每个高压插件的界面对应为一个 HVBoardSubpanel.vit 的文件。LabVIEW 中，在调用.vit 类型文件时，会在内在中产生该文件的一个副本，并且副本之间互相独立，因此此文件可以同时被调用多次。

2. 高压控制界面如图 29 所示：

与主界面对应，控制界面也包含多个插件，每一个插件为一个方框。在方框上方显示了这个插件的名字，与主界面上的名字一一对应。“PwCtlAll”开关控制整个插件高压的开关，而“GroupNO”开关对应控制主界面上相应组高压的开关。

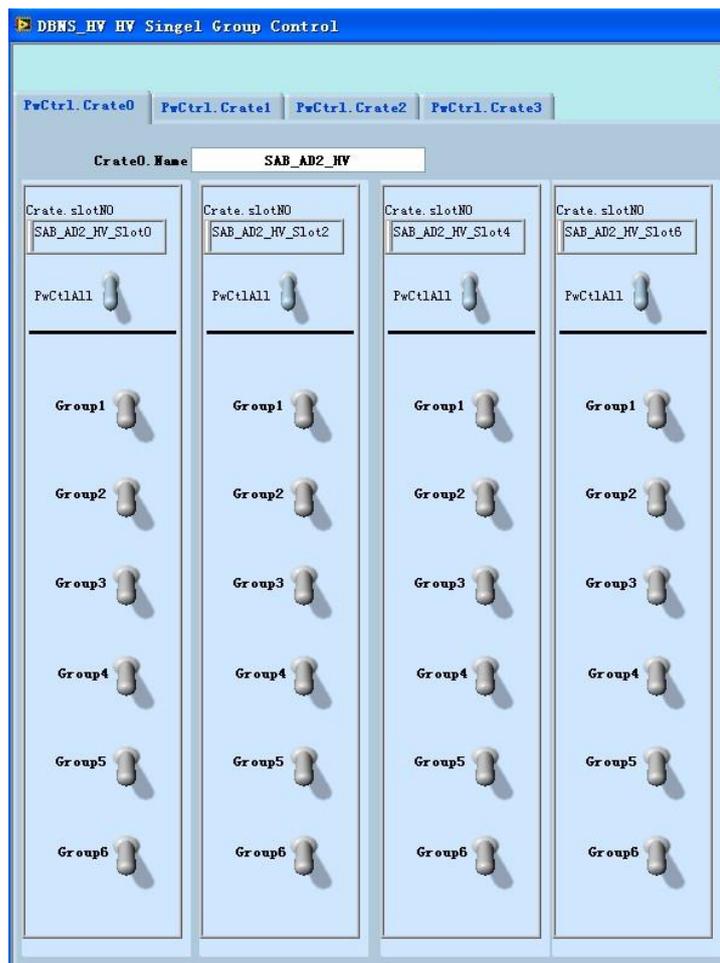


图 29 PMT 高压控制界面

2.4.1.2 RPC 的高压监控系统

RPC 高压所使用的高压插件 A1733P 和 A1733N 与 PMT 的高压插件 A1932 最大的不同是 A1722P/N 插件中没有 Primary channel, 而且每个插件有 12 路输出高压, 并且没有分组, 都可以进行单独控制。

由于 RPC 气体探测器的特性, RPC 的高压在升降时速度比较慢, 所以 RPC 的高压在设置工作高 (V_{work}) 的同时, 设置了预备高压 (V_{pre})。在 RPC 需要降高压时, 可以只降到预备高压, 这时探测器就处于安全状态了, 而再次升高压时也会大大缩短时间。

2.4.1.3 高压机箱插件与终端设备对应关系

RPC 高压与 PMT 高压另一个特点是, 高压插件的每路高压输出都连接到了一个中间设备, 再通过中间设备为终端设备提供高压。因此设计了一个高压通道

与终端设备的关系表来维护这个关系，同时提供友好的查询功能，用户提供三者之中任一信息都可以查询到与它对应的另外两种信息。

这样设计的好处就是把高压的真实地址与终端设备进行了隔离。在对高压机箱进行操作时使用高压的真实地址，使用对软件的维护方便快捷。在数据显示及存储时使用终端设备的编号，这样非常便于用户的理解。同时，当某路高压需要更换时，只需更新一个关系表即可，不会对用户产生任何影响，也方便了软件的维护。

2.4.2 VME 机箱监控系统

2.4.2.1 需求分析



图 30 W-IE-NE-R VME 机箱

VME 机箱主要是作为电子学的读出平台，为电子学插件提供电源，提供电子学散热，温度监测等功能。大亚湾所选用的 VME 机箱为 W-IE-NE-R 的 VME 机箱，如上图所示。同时此机箱提供了 8 个外接温度探头的接口，可以更好的监测此机箱重要插件的温度。VME 机箱如图 30 所示。

VME 机箱监控系统需要对 VME 机箱中的重要物理量进行监测，包括+3.3V、+5V、+12V、-5.2V、-12V，5 个通道的电压和电流、8 个外接温度探头和风扇温度、风扇转速、开关状态等；同时提供开关 VME 机箱的控制功能。

这个机箱提供的接口类型为 RS232 和 Ethernet；通讯协议包括 CAN（Controller Area Network，即控制器局域网）协议和 SNMP 协议。SNMP 协议是基于 TCP/IP 协议的一种网络标准，其工作模式为 Client/Server 结构，可以直接开发基于 SNMP 协议的分布式全局控制软件。

CERN 开发了该 VME 机箱的 OPC Server，使通过 CAN 协议与 VME 机箱通

讯得以简化[45]。但是，需要购买 Kvaser CAN/PCI Card，而且由于数据先从 CAN/PCI Card 传输到上位机的 OPC Server 然后，再通过 LabVIEW 的共享变量支从 OPC Server 中读取数据，过程较为复杂，在程序开发以及安装过程，甚至后期的维护都会付出较大的精力。

VME 机箱监控系统基于 SNMP 协议开发，会更加方便。

2.4.2.2 SNMP 协议

SNMP 协议，即 Simple Network Management Protocol, 简单网络管理协议 [46]。SNMP 协议实际上包含了三个协议：MIB (Management Information Base 管理信息库)、SMI (Structure of Management Information, 管理信息结构)、SNMP。并且 SNMP 基于 Client/Server 模式。

IETF (Internet Engineering Task Force, 互联网工作任务组) 对 MIB 管理信息库进行了规定。规定中定义了由 OID (Object Identifier, 即对象识别符) 对可访问的网络设备及其属性进行唯一指定。MIB 是一个树形结构，SNMP 协议通过遍历 MIB 树目录中的节点来访问网络中的设备。如，OID: 1.3.6.1.4.1 代表企业，1.3.6.1.4.1.2 代表 IBM，1.3.6.1.4.1.9 代表 Cisco。

SNMP 协议在 TCP/IP 协议中使用 UDP 协议作为其消息传输的协议。SNMP 消息报文包含两个部分：SNMP 报头和 PDU (Protocol Data Unit, 即协议数据单元)。其结构如下表所示：

表 8 SNMP 报文数据结构

版本标识符	团体名	PDU
-------	-----	-----

版本标识符 (version identifier): 确保消息两端使用相同的协议。

团体名 (Community Name): 用于 SNMP 的 Client 端向 Server 端进行认证；如，public 只具有读权限，而 private 具有读和写权限。

PDU: 包含 SNMP 的消息类型及其相关参数。

SNMP 协议中包含五种消息类型，分别是：

1. Get request: 用于从设备读取一个或多个参数的数据；
2. Get next request: 用于从设备读取当前参数的下一个参数的数据；
3. Set request: 用于向设备上一个或多个参数进行写操作；

4. Get response: 返回一个或多个参数的数据,是上面三个消息的响应操作,发生在设备端;
5. Trap: 由设备主动发出的消息。

2.4.2.3 VME 机箱中物理量的 OID 码

VME 机箱中需要监控的物理量包括:电压、电流、外接探头温度、风扇转速、风扇温度、开关状态等。每一个物理量都对应一个 OID 码,通过 SNMP 协议与 VME 机箱通讯,就需要知道这个 OID 码。W-IE-NE-R 公司提供的 MIB 文件中包含了这些物理量对应的 OID 码[47]。从其主页下载到的文件为:WIENER-CRATE-MIB.txt。然后使用 MIB Browser 软件可以读取其中的信息。如图 31 所示:

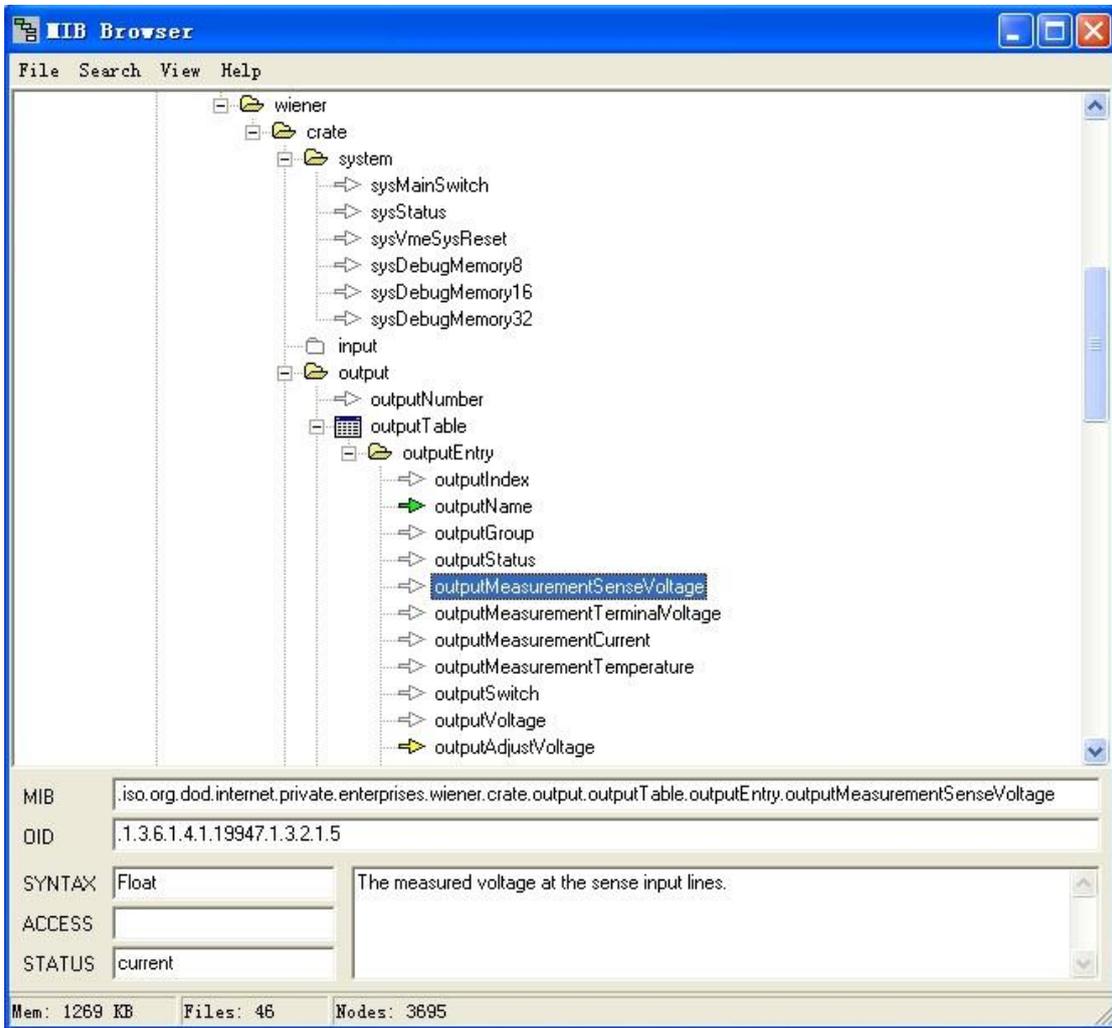


图 31 MIB Browser 读取 VME 机箱 OID 信息

从图中可以看到,“outputMeasurementSenseVoltage”物理量的 OID 码为

“1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1.5”，数据类型为“Float”。但是每个 VME 机箱提供了五组电压和电流输出。因此每一个真正的电压输出值还需要在上面的 OID 码后面再加一个编号，而这个编号需要从 VME 机箱读取数据来确定每组电压值所对应的编号。

2.4.2.4 数据采集及控制

数据采集及控制主要实现与 VME 机箱的通讯，包括读取和写入两部分。这部分程序的流程图如图 32 所示：

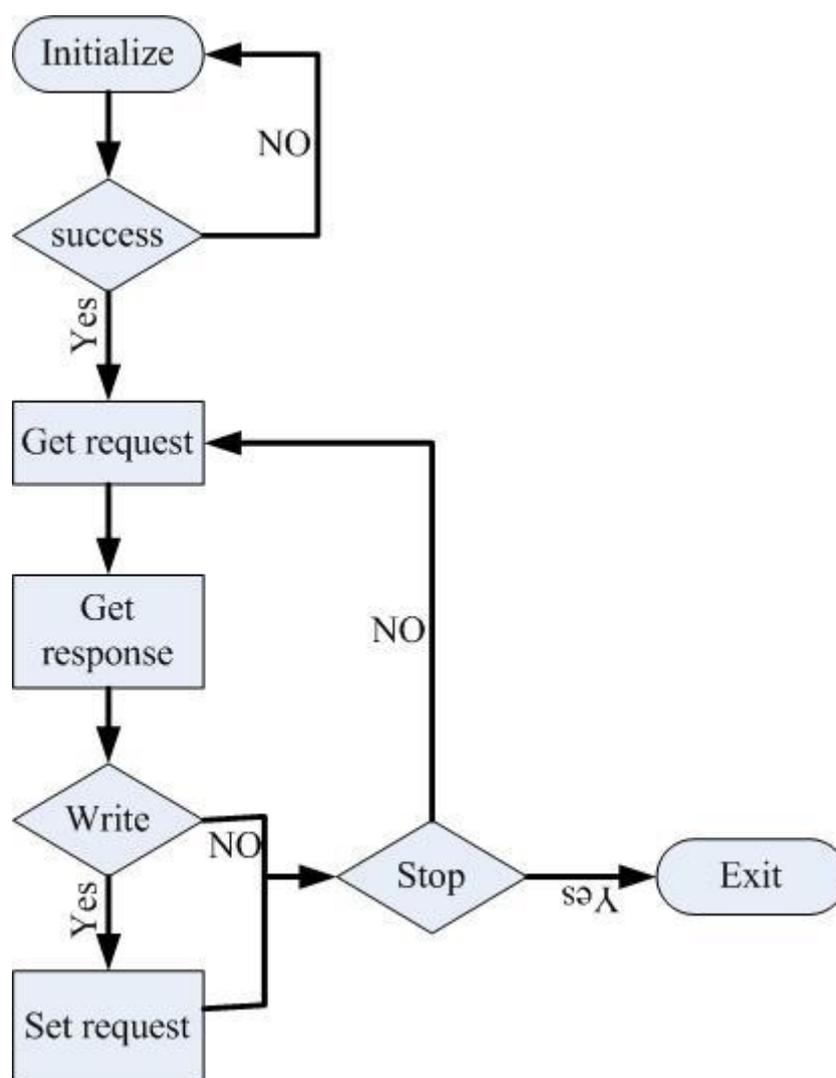


图 32 VME DAQ 流程图

1. 初使化负责打开一个 UDP Socket 端口，如果打开成功则返回一个 UDP Connection ID，开始与 VME 机箱进行通讯。

2. Get request 是向 VME 机箱发送读命令，其所需参数如图 33 所示：

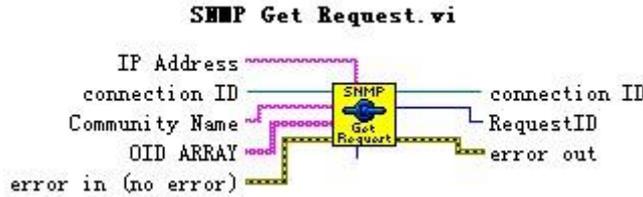


图 33 SNMP Get Request

IP Address 是 VME 机箱的 IP 地址; connection ID 是初使化完成时返回的 UDP Connection ID; Community Name 是此命令的权限, 在这里由于是读命令, 所以使用 “public” 即可; OID ARRAY 是要读取的所有物理量的 OID 数组。

3. Get response 是向 VME 机箱读回所请求的数据, 其输入输出参数如图 34 所示:

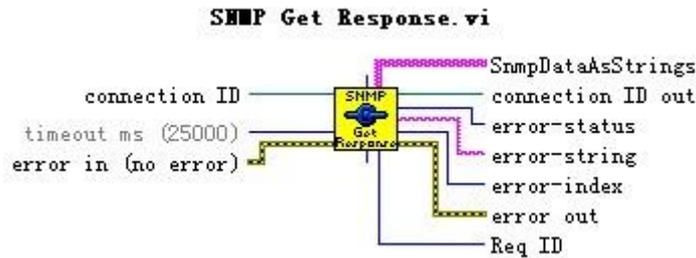


图 34 SNMP Get Response

其返回的数据为 SntpDataAsStrings, 数据类型为一个二维字符串数组, 在添加了物理量的参数名后, 如图 35 所示:

OID	Parameter Name	Type	Value
1.3.6.1.4.1.19947.1.1.1.0	mainswitch	INTEGER	1
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1	Voltage.+5V	OPAQUE	{9F}\04@\A0\F5\C2
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1	Voltage.+12V	OPAQUE	{9F}\04AAG\AE
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1	Voltage.+3.3V	OPAQUE	{9F}\04@Tz\E1
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1	Voltage.-5.2V	OPAQUE	{9F}\04@\A7\n=
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1	Voltage.-12V	OPAQUE	{9F}\04A@z\E1
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1	Current.+5V	OPAQUE	{9F}\04A\8Dp\A4
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1	Current.-12V	OPAQUE	{9F}\04=#\D7\n
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1	Current.+3.3V	OPAQUE	{9F}\04Av\B8Q
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1	Current.-5.2V	OPAQUE	{9F}\04@mp\A3
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1	Current.-12V	OPAQUE	{9F}\04= \A3\D7\n
1.3.6.1.4.1.19947.1.4.2.1	T1	INTEGER	-128
1.3.6.1.4.1.19947.1.4.2.1	T2	INTEGER	29

图 35 VME 机箱返回信息

其中第一列是所要读取物理量的 OID 码, 第二列是在返回数据中添加的物理量的参数名, 第三列是返回数据的类型, 第四列是相应物理量的数据。

OPAQUE 数据类型；电压电流的值为 float 类型；float 类型的值 123 以基本编码规则表示为：‘9f780442f60000’ h，其中 ‘9f78’ h 是标识位，‘04’ h 是数据长度，‘42f60000’ h 是数据。这个编码的 OPAQUE 类型表示为：‘44079f780442f60000’ h，其中 ‘44’ h 是标记位，‘07’ h 是数据长度，‘9f780442f60000’ h 是数据[48]。

4. 在每一次读取数据后，检查是否有写操作，即开关 VME 机箱；如果不需要对 VME 机箱进行操作，然后判断是否退出程序。

5. 对 VME 机箱进行写操作的 VI 的输入输出参数如图 36 所示：

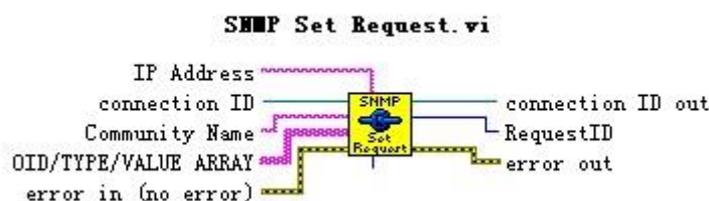


图 36 SNMP Set Request

Community Name 在这里为 ‘private’，以获得写权限。OID/TYPE/VALUE ARRAY 是需要进行写操作的物理量的信息，以开关 VME 机箱为例，其信息如下表所示：

表 9 VME 机箱进行写操作的命令信息

OID	TYPE	VALUE
1.3.6.1.4.1.19947.1.1.1.0	INTEGER	1
1.3.6.1.4.1.19947.1.1.1.0	INTEGER	0

完成写操作后判断是否退出程序。

6. 判断是否退出程序，如果不退出，就进入下一个读数循环；否则进入 Exit。

7. Exit 进程负责关闭 UDP Socket 端口。

由于 SNMP 协议基于 Client/Server 工作模式，所以基于 SNMP 协议开发的 VME 机箱监控系统实现了分布式数据管理，在实验厅或控制室都可以运行。

2.4.2.5 配置模块

根据 VME 机箱的数据结构，其参数配置信息界面如图 37 所示：

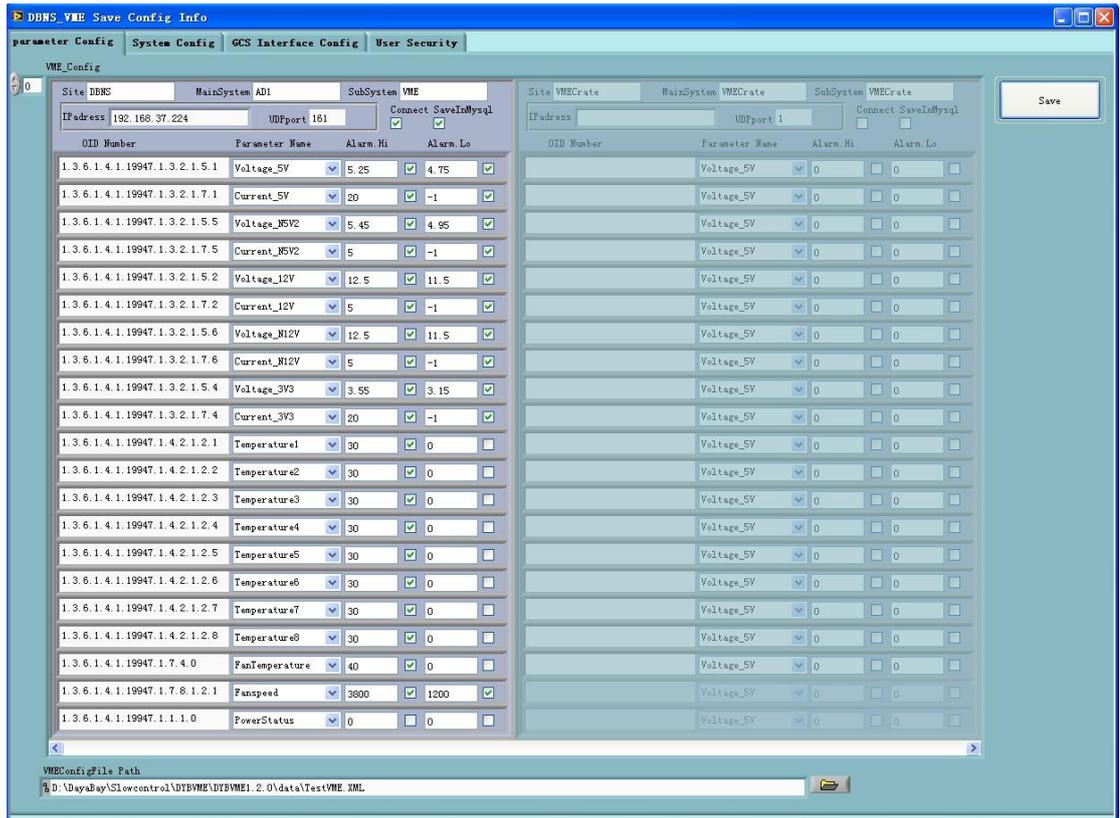


图 37 VME 参数配置界面

Site: 此 VME 机箱所在的实验厅: DBNS(大亚湾近点)、LANS(岭澳近点)、FARS(远厅);

Main System: 表示此 VME 所属的探测器: AD(反符合探测器)、RPC(RPC 气体探测器)、IWP(内水池探测器)、OWP(外水池探测器);

IP address: VME 机箱的 IP 地址;

UDP port: UDP 连接所使用的端口;

Connect: 考虑到此软件可以连接多个 VME 机箱,在调试阶段,如果各个子系统使用同一个软件的话,可以对不同子系统的 VME 机箱进行是否连接的选择,以应对不同子系统的需求;

Save In Mysql: 理由同上,每一个 VME 机箱的数据单独存入一个数据库,用此选项选择是否将此 VME 机箱的信息存到数据库;

OID Number: 所监控物理量的 OID 码;

Parameter Name: 所监控物理量的参数名称;

Alarm Hi and Alarm Low: 设置这个物理量的安全范围,即报警的上下限域值;

两个布尔选项：设置是否对这个物理量的相应域值进行报警；

VME Config File Path：显示当前配置文件的路径即文件名；

Save 按钮：保存参数配置信息。

2.4.2.6 数据库表的设计

大亚湾实验中每个 VME 机箱对应一个子探测器，因此在设计数据表时把每一个 VME 机箱的信息作为一个数据表来存储。

其中 float 类型采用 DECIMAL 类型，而温度等整形变量采用 INT 类型，开关状态实际可由 Boolean 类型存储。

2.4.2.7 主界面

如图 38 所示，主界面正中部分的每一个方框表示一个 VME 机箱。显示了 VME 机箱中五组电压和电流值、以及外接的探头温度和风扇温度、风扇转速、开关状态、报警状态、机箱名等信息；其中的开关可以对 VME 进行开关操作。

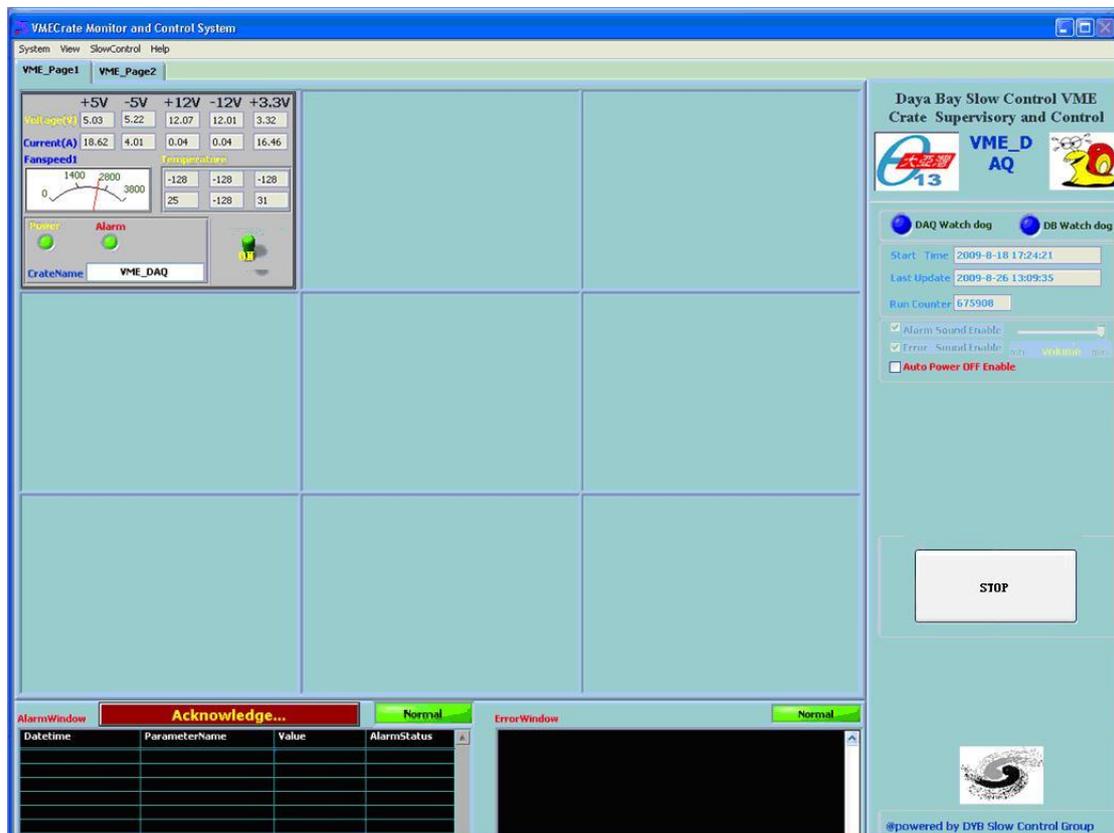


图 38 VME 监控软件主界面

2.4.3 基于 DIM 的监控系统

2.4.3.1 需求分析

在大亚湾探测器控制系统中，一部分监控系统是由高能所慢控组或其他合作组成员基于嵌入式开发的系统。基于探测器控制系统分布式数据管理的需求，我们要求在这类嵌入式电子学开发板上采用 DIM Service 的形式传输采集到的数据。监控软件可以作为 DIM Client 去从 DIM Service 取得数据，完成对探测器的监控，同时，这样的设计也实现了分布式数据管理，监控软件可以运行在实验厅或控制室进行监控。

温度监测系统负责监测环境温度以及某些探测器的温度，由东莞理工大学负责硬件部分的研发，以及温度探头的选择。低压电源监控系统负责对 RPC 的低压电源进行监控，嵌入式电子学开发板由高能所的慢控组开发。同类的系统还包括了气体的监控系统等。

实际上这类监控系统的数据采集模块也就是监控软件框架中的分布式模块。因此需要实现 Server 和 Client 的功能。这个模块会被移植到不支持分布式数据管理的硬件设备的本地监控软件及其全局监控软件上。

2.4.3.2 Name Server、Server、Client 的设置

Name Server 设置如下：

1. 大亚湾的 Name Server 安装在 Linux 的服务器上，从 CERN 下载 UNIX/LINUX 版的 DIM 安装包；
2. 编译：先设置环境变量 ‘OS’ 为 ‘Linux’；然后在 DIM 所在目录运行 ‘gmake all’ 命令对 DIM 进行编译；编译完成后，设置环境变量 DIM_DNS_NODE 为此服务器的计算机名或 IP 地址；
3. 最后运行编译好的可执行文件 Dns，即完成了 Name Server 的设置。

Server 和 Client 的设置如下：

1. 设置环境变量 DIM_DNS_NODE 为 Name Server 的计算机名或 IP 地址；
2. 设置 C:\WINDOWS\system32\drivers\etc 下的 hosts 文件，添加 Name Server 以及需要通讯的电脑的相关信息，即 IP 地址与域名或计算机名的对应关系。

2.4.3.3 数据采集模块

2.4.3.3.1 DIM Client 读取 Service 的方式——Service Type

DIM Client 从 DIM Server 之间通讯的 4 种方式[46]:

1. Once only: 客户端向服务器端发送请求后, 只得到一次返回数据;
2. Timed: 客户端向服务器发送请求后, 服务器端定时返回数据;
3. Monitored: 客户端向服务器发送请求后, 服务器端在数据变化时返回数据;
4. Command: 客户端向服务器端发送命令信息。

考虑到这类监控系统所监测的物理量的变化并没有非常大的突变。如图 39 所示为大亚湾实验中一个温度探头一段时间的变化趋势:

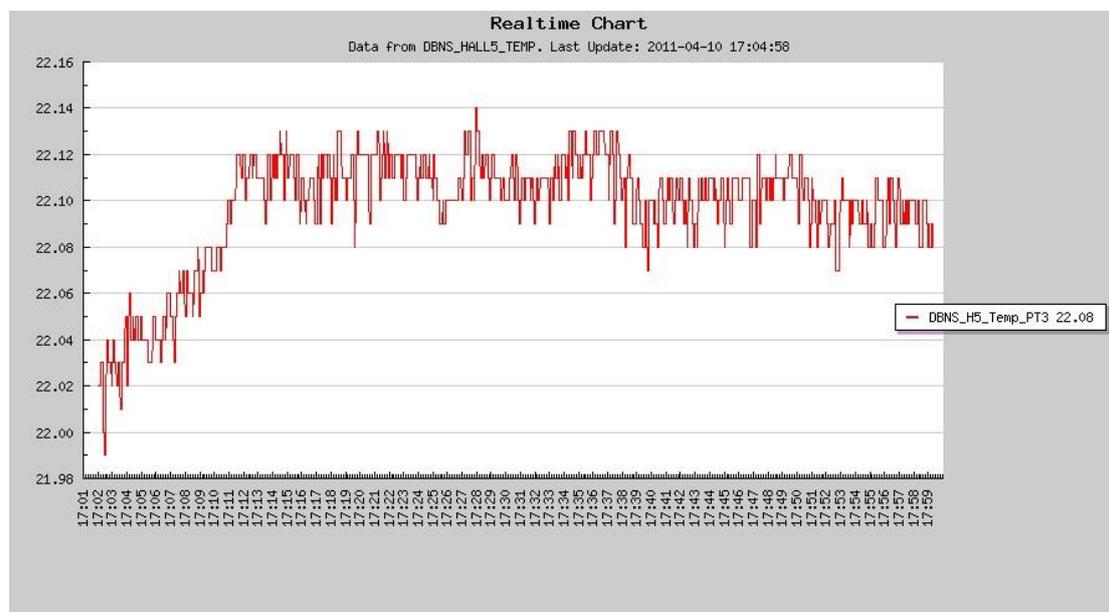


图 39 温度探头数据趋势

因此采用 Timed 的读取方式即可以监测温度的趋势, 同时又比 Monitored 的读取方式节省了系统资源。

2.4.3.3.2 程序设计

DIM Client VI 负责向 Name Server 订阅其所需要的 DIM Server 的信息, 然后从 DIM Server 读取 Service 信息, 其 LabVIEW 程序框图如图 40 所示:

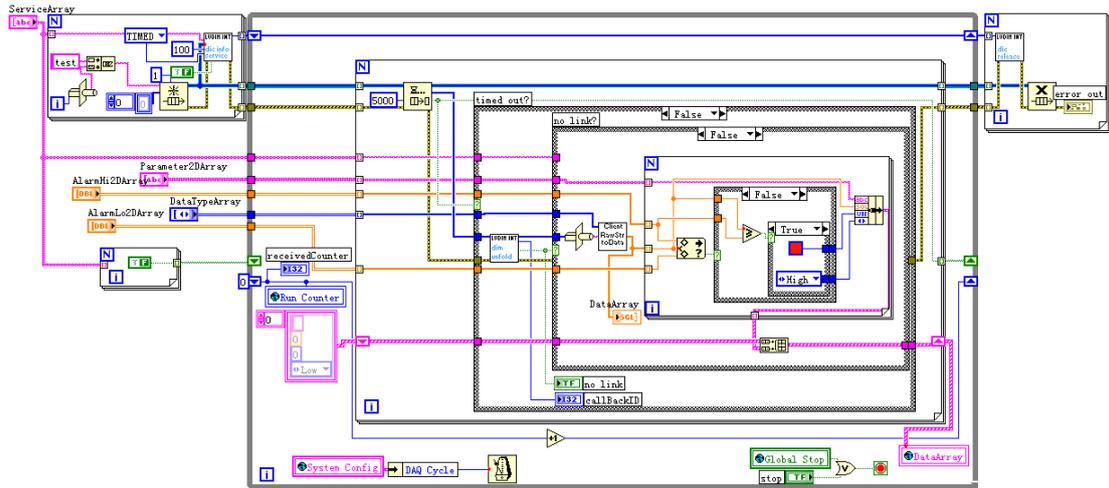


图 40 DIM Client 程序框图

其程序流程图如图 41 所示：

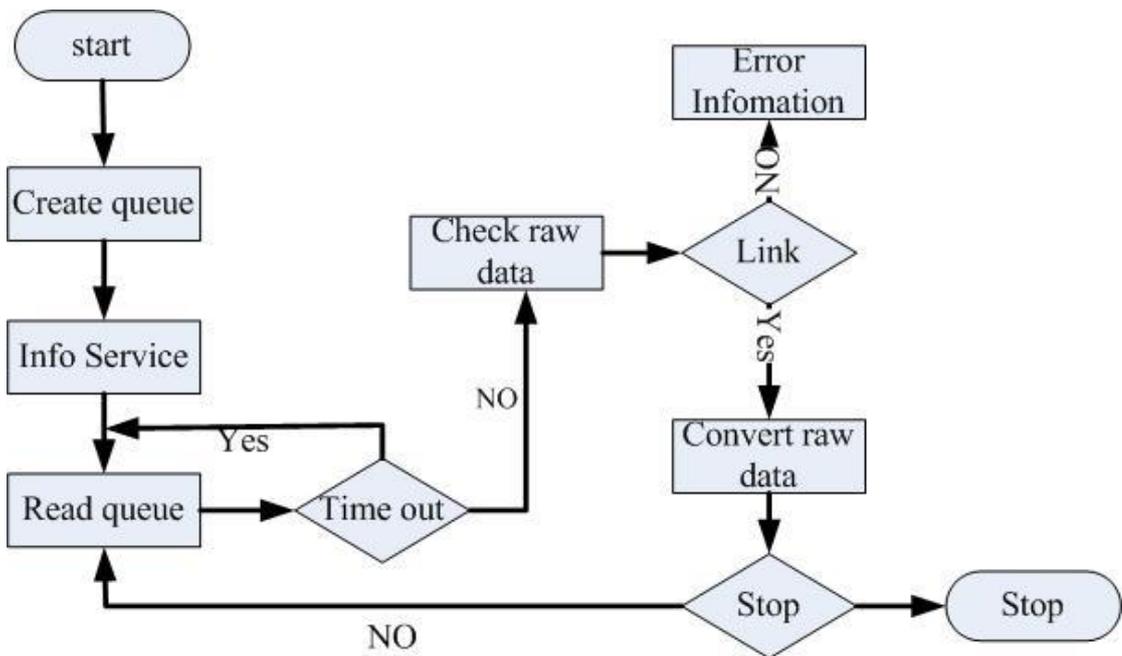


图 41 DIM Client 流程图

1. 程序开始执行后，首先建立一个队列，用来存储从 DIM Server 返回的 Service 数据；
2. 向 Name Server 请求所需要的 Service 信息。其所需要的输入参数包括：Service Name，Service Type，队列参考值；
3. 从队列读取原始数据：如果读取超时，进行下一次读取；如果读到原始数据，进行下一个步骤；

4. 检查原始数据：根据原始数据判断 Client 与 Server 的连接状态，如果连接断开，给出错误报警信息；如果处于连接状态，则进行下一个步骤；
5. 转化原始数据：由于原始数据是 I8（8 bit integer -128 to 127）类型的数组，所以需要根据 Service 发布的数据类型，把原始数据转化为真实的数据类型；

为了避免多个进行在同一时间对 libDimWrapper.dll 进行调用，DIM 中使用了信号量机制。因此，需要一个专门的 VI 对所有 DIM 的相关 VI 进行管理，并在所有 DIM 相关 VI 启动之前就启动这个 VI。DIM Client 完整数据采集部分的程序框图如图 41 所示：

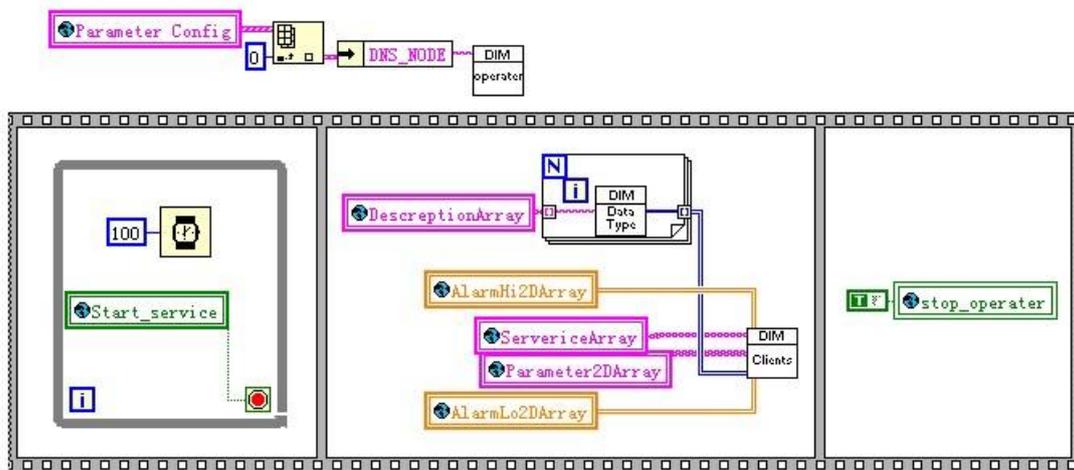


图 42 DIM Client DAQ 程序框图

其中 DIM operator VI 负责创建信号量[50]来对所有 DIM 的相关 VI 进行管理，同时调用 DIM Dispatcher VI 来接收来自 DIM Server 的 Service 数据，并把数据写到由 DIM Client VI 创建的队列中。同时，DIM operator VI 还要保证在所有其它 DIM 相关 VI 关闭之后才关闭。

DIM Server 部分程序设计与 Client 的程序设计类似，同样需要通过信号量对相关 VI 进行管理。

2.4.3.4 配置信息数据结构

为了使软件有更好的扩展性，监测软件需要考虑从多个 Service 读取数据。参数配置界面设计为一个簇的数组，其中每一个簇代表一个 Service 的配置信息。每一个 Service 的配置信息应该包括：

DNS_NODE：即 Name Server，需要注意的是这里并不一定是 Name Server

的 IP 地址或计算机名，而应该是环境变量中设置的 DIM_DNS_NODE 的值；

Service Name: 所需读取的 Service 的名字；

Description: 对 Service 的数据类型的描述；

物理量数组: 每一个元素是一个簇，代表一个物理量的配置信息；

每个物理量包含的配置信息有：参数名，软件及数据库中的标识符；端口号，电子学板上的通道号；报警上下限阈值等信息；描述信息，如温度探头的位置信息等。

2.4.3.5 主界面



图 43 温湿度监测系统主界面

图 43 是 5 号厅安装的 4 个温度探头的监测界面显示。温度监测系统只有监测，没有控制量。

2.4.4 AD 端盖监测系统

2.4.4.1 需求分析

AD 端盖包含了三层液体的溢流罐以及各种设备的接口,如:刻度系统接口、电子学接口、气体系统接口、液体注入接口等,这就需要安装各种设备、探头来监测 AD 的状态。AD 端盖安装的设备 and 探头如图 44 所示:

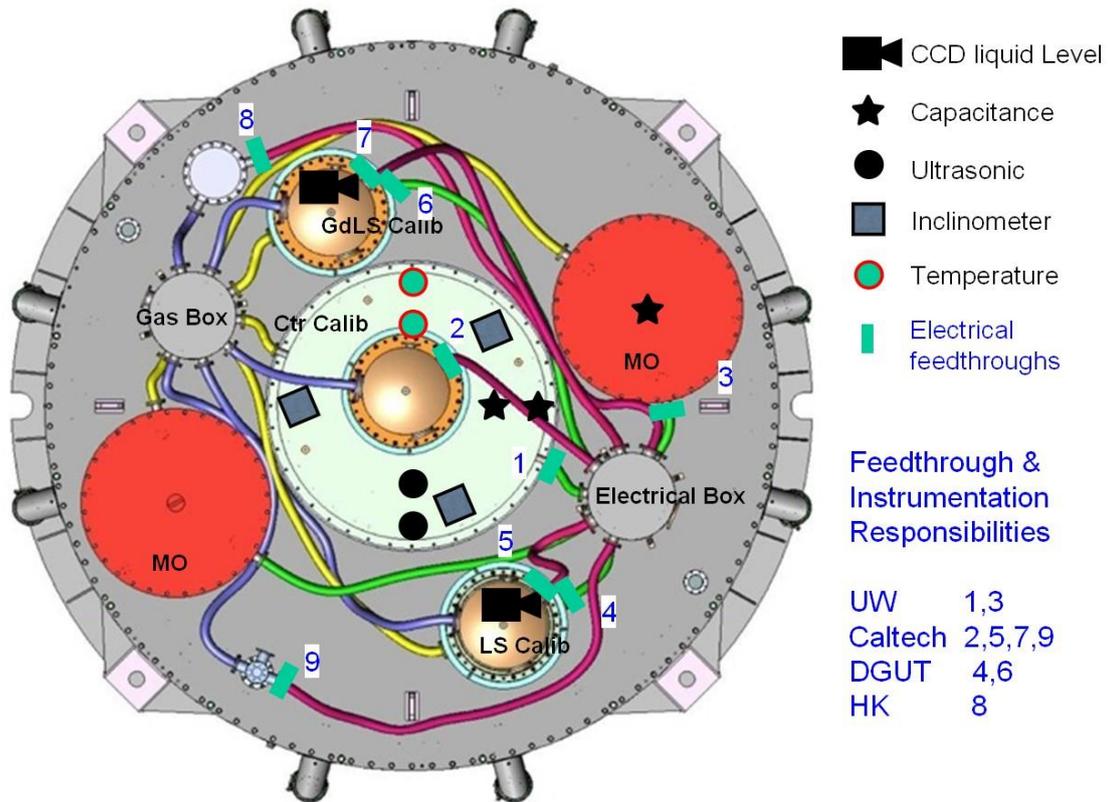


图 44 AD 安装的各种设备和探头

主要有 4 个合作组成员参与了安装。其中 UW (University of Wisconsin) 负责的主要任务为[51]:

1. 监测 MO (矿物油)、中心溢流罐的液位高度;
2. 监测注入及在水池中的 AD 的水平程度;
3. 监测 GdLS (掺钆液闪)、LS (液闪) 温度等。

由于此系统的硬件设备不支持分布式系统,所以在需要开发本地控制软件来实现这个系统的分布式管理。

2.4.4.2 AD 端盖监测系统本地监控软件的整合

UW 在完成安装监测设备的同时，提供了端盖监测系统的数据采集部分。探测器控制组的任务就是将此数据采集部分整合到探测器控制系统的本地监控系统框架中，以提供探测器控制系统的统一的功能，包括：各种硬件及软件信息配置功能、报警功能、数据库存储功能等。

由于数据采集部分程序不能访问监控软件框架中的数据池，所以会带来相关的一些问题，如：数据的 I/O、程序的控制等问题。由于大量的硬件信息需要输入，因此所有信息被整合到一个簇中以简化数据的输入；通过队列取得从硬件采集到的数据，提供给其他相关模块使用；引入“通知”技术对此部分程序进行控制。

AD 端盖监测系统提供了一个 AllSensorReadoutCore.vi 作为接口，与探测器本地控制系统进行整合。此 VI 的输入输出变量如图 45 所示：

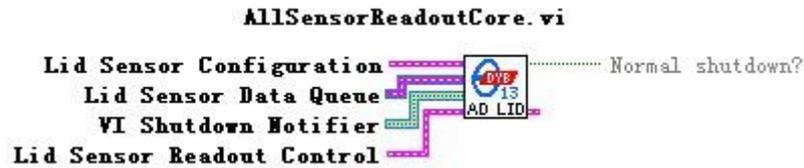


图 45 AD AllSensorReadoutCore IO

其中 Lid Sensor Configuration 和 Lid Sensor Readout Control 是两个包含其相关配置信息的簇；Lid Sensor Data Queue 是存储从硬件采集到的数据的队列；VI Shutdown Notifier 是一个通知器，其作用是控制此 VI 何时关闭。所有整合工作将围绕此 VI 展开。

2.4.4.2.1 配置模块

配置模块功能主要是提供对配置信息文件的统一管理，可分为三部分：参数配置信息、界面配置信息、系统配置信息等。

1. 参数配置信息界面如图 46 所示：

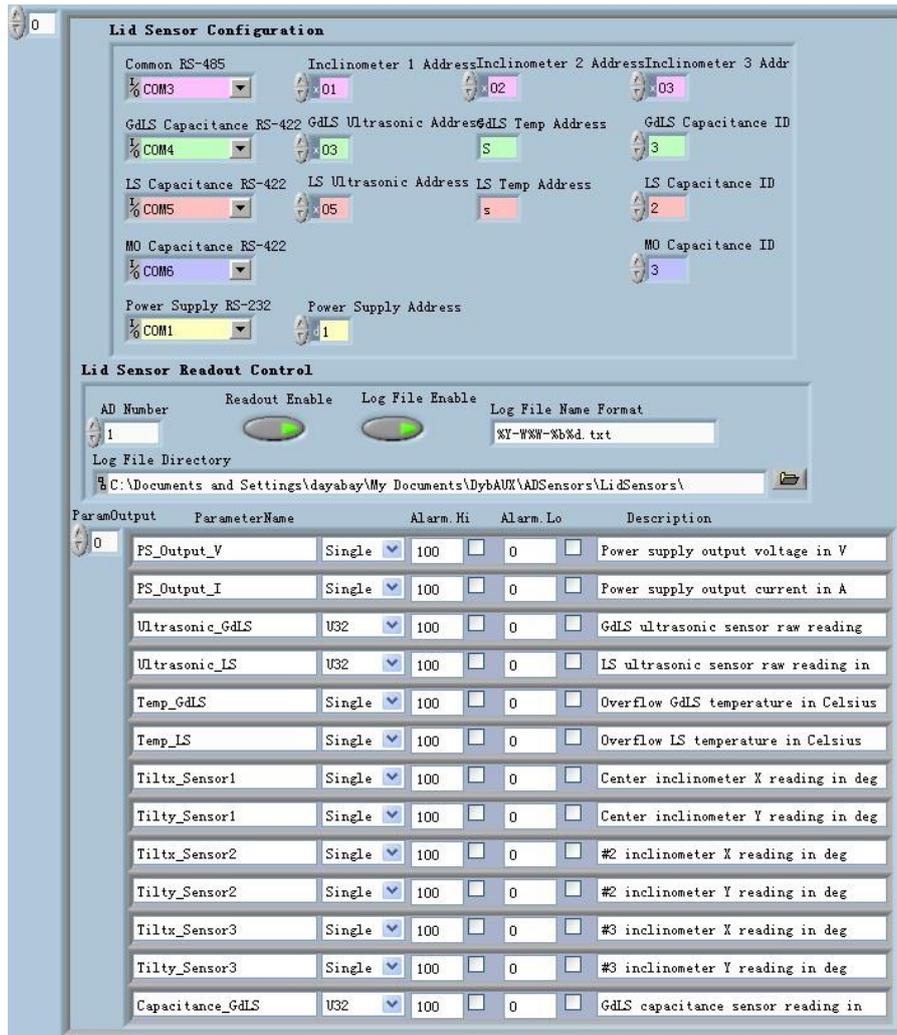


图 46 AD 端盖监测系统的参数配置界面

参数配置信息主要包括两部分：

AllSensorReadoutCore.vi 所需要的配置信息：Lid Sensor Configuration 和 Lid Sensor Readout Control 信息；

物理量相关信息：包括其参数名、数据类型、报警上下域值、描述信息等。

2. 界面配置信息是对主界面调用显示 VI 的配置。
3. 系统配置信息是对数据库、用户及密码等的配置。

2.4.4.2.2 数据采集部分程序设计

数据采集部分，基于调用 AllSensorReadoutCore.vi 实现。其 LabVIEW 程序框图如图 47 所示：

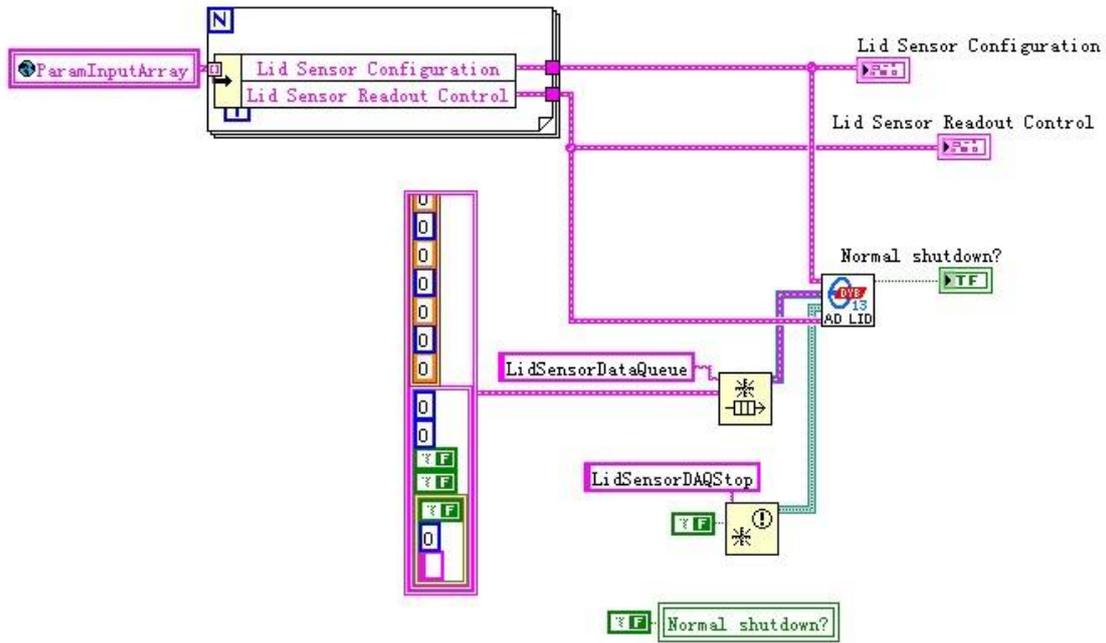


图 47 AD Lid Sensor DAQ

将其所需要的信息传入此 VI 即可。

2.4.4.2.3 数据存储、报警判断及显示

由于数据被存放在一个队列中，而对数据进行存储、报警判断及显示都需要读取队列中的元素，而且要保证每一操作对队列中的一个元素处理且仅处理一次；在处理完这些操作之后，需要删除队列中对应元素以释放空间；因此需要一个良好的机制来完成对此队列的管理；这个机制需要实现如下功能：

1. 在一个操作处理完数据队列中一个元素后，产生一个对应此操作的标识；在此操作下一次处理时，检查此标识，如果此元素已经处理过，则不再处理；
2. 在三个操作处理完数据队列中的一个元素后，将数据队列中此元素删除，同时将各操作对应的标识复位。

在三个操作中，可以只对两个操作进行标识，第三个操作可以检查另两个标识，来完成其自己的读取任务，并将数据删除以及将标识复位。在此将对数据存储和报警判断进行标识，而在数据显示时检查另外两个标识的状态。

存储数据队列并进行标识的流程图如图 48 所示：

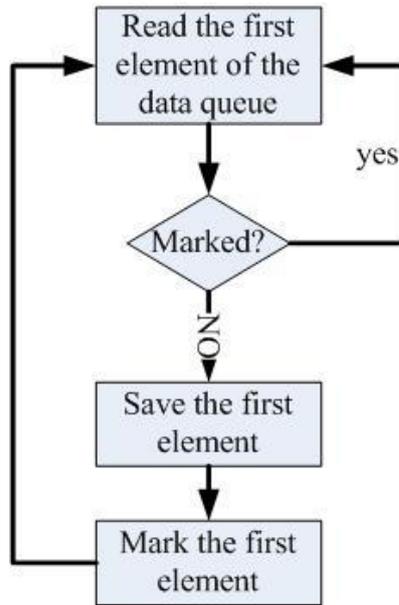


图 48 存储数据队列并进行标识

删除数据队列元素以及标识的流程图如图 49 所示：

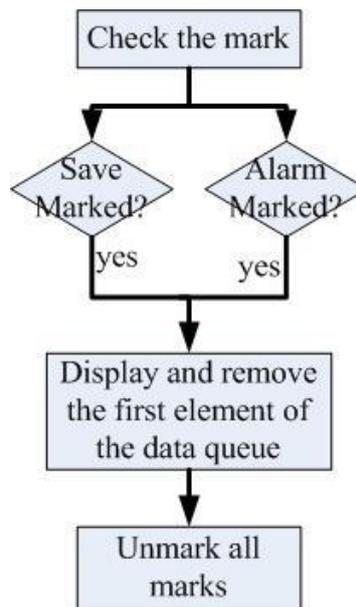


图 49 删除数据队列元素及标识

由于标识需要标识和复位功能，所以采用队列的技术来存储标识。并且将所有标识放在一个簇中，作为标识队列的元素。并且在创建队列时需要设置此队列大小为 1，以保证每个读取此元素的用户操作的是同一个元素；同时在创建后需要添加一个复位状态的元素，这样所有用户才可以对此元素进行操作。复位标识的程序框图如图 50 所示：

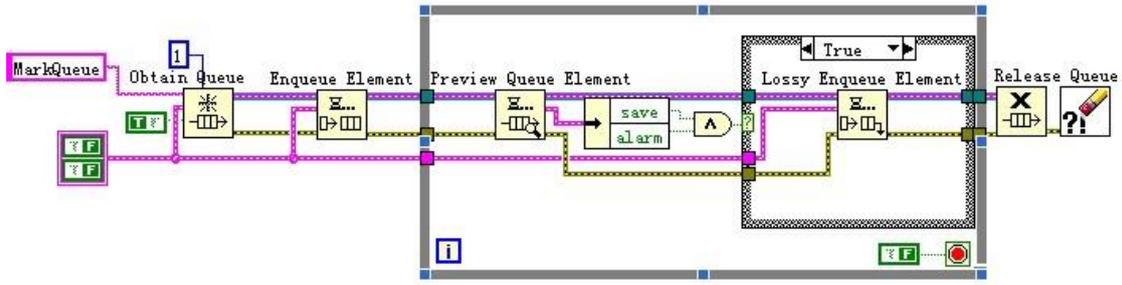


图 50 复位标识程序框图

1. 创建大小为 1 的队列 MarkQueue;
2. 添加两个为 False 的标识到队列中;
3. 检查标识, 当两个标识都为 True 时, 重新将标识赋值为 False;
4. 程序退出时删除队列。

AD 端盖监测系统的数据类型分为两类: float 类型, 在数据库中存储为 DECIMAL 类型; U32 (无符号长整形, 大小为 4 个字节), 在数据库中存储为无符号整型。

图 51 是通过网页查询的 AD 端盖监测系统的数据:

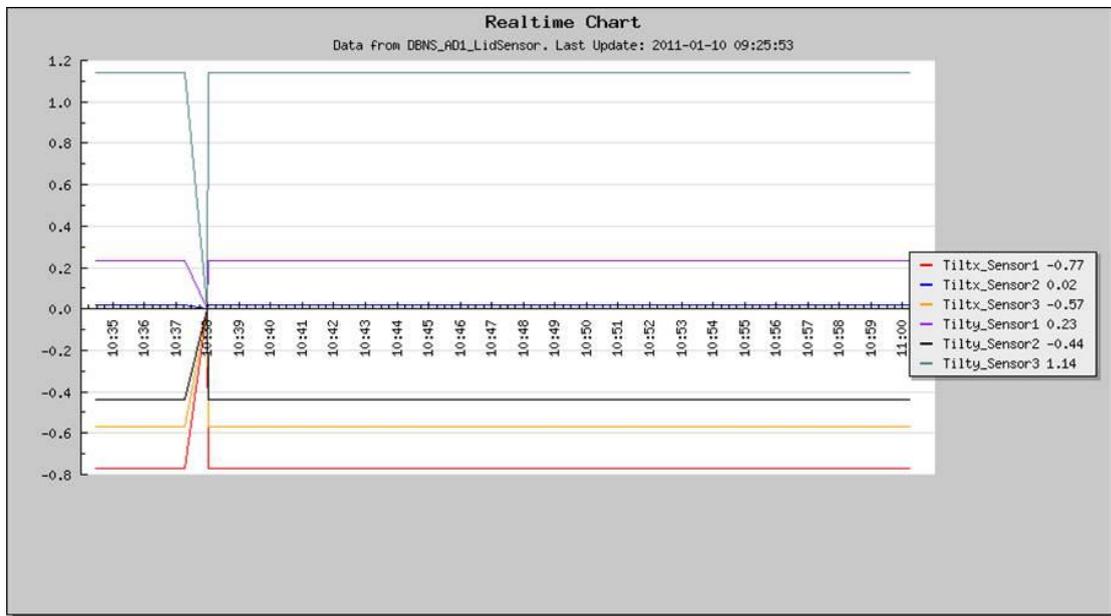


图 51 AD 端盖监测系统网页查询数据

2.4.4.2.4 主界面

AD 端盖监测系统主界面如图 52 所示:



图 52 AD 端盖监测系统主界面

这是主界面中 AD1 的状态显示界面。监测数据显示包括图形及数据两种显示模式。

2.5 全局控制系统

全局控制层主要包括全局控制软件、数据库存储服务器、Web 数据查询服务器三个组成部分。

2.5.1 全局控制系统设计

全局控制系统的任务是实现对各个实验厅中所有探测器的监测和控制；需要实现的功能包括：显示来自所有探测器的监测信息，提供对各厅探测器的控制，提供报警、错误等信息提示，允许用户对配置信息进行更新等。全局控制系统与本地控制系统在这些功能上可以说是一致的，因此同样采用了模块化的设计模式。其与本地控制系统的模块化设计的异同如图 53 所示：

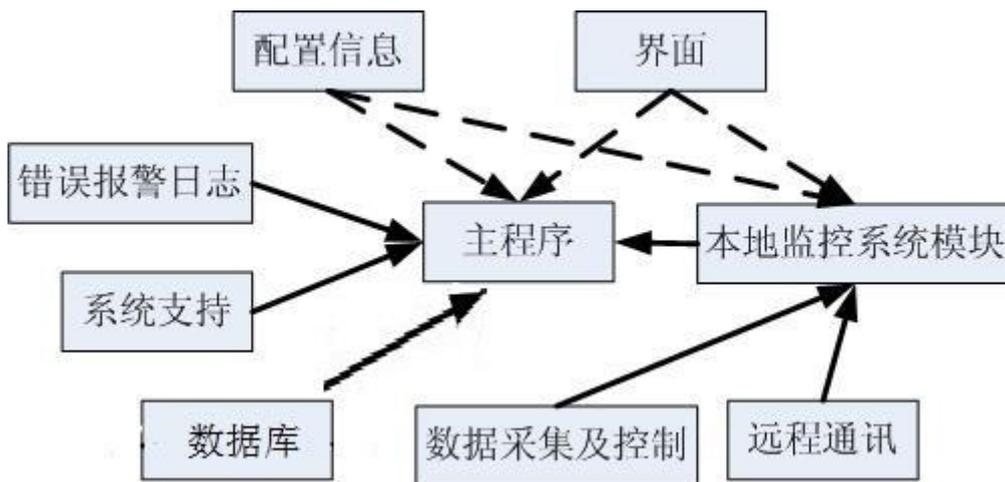


图 53 全局控制系统组成模块

其中错误报警日志模块与本地控制系统的相应模块执行相同功能；

由于所有监测数据存储到数据库由本地控制系统实现，所以全局控制系统不需要数据库模块；

在全局控制系统中，数据采集及控制模块和远程通讯模块实现同一功能，因此这两个模块可以整合到一个模块——本地监控系统模块；同时为了使本地监控模块功能尽量集成，将其相应的配置部分、界面部分一起整合到此模块中；

配置信息、界面部分将与本地监控系统模块相关部分分离出去，只保留与全局控制系统主程序相关部分。

2.5.1.1 本地监控系统模块

全局控制系统中的本地监控系统模块主要负责读取本地监控系统的数据，并向其发送控制命令来控制本地的探测器。可以说这个模块是全局控制系统的核心模块，全局控制系统全部功能的实现将依赖于这个模块。而针对于不同的本地监控系统其所实现的功能及其界面等信息也存在差别，因此这个模块需要根据不同的本地监控系统开发相应的模块。

本地监控系统模块的流程图如图 54 所示：

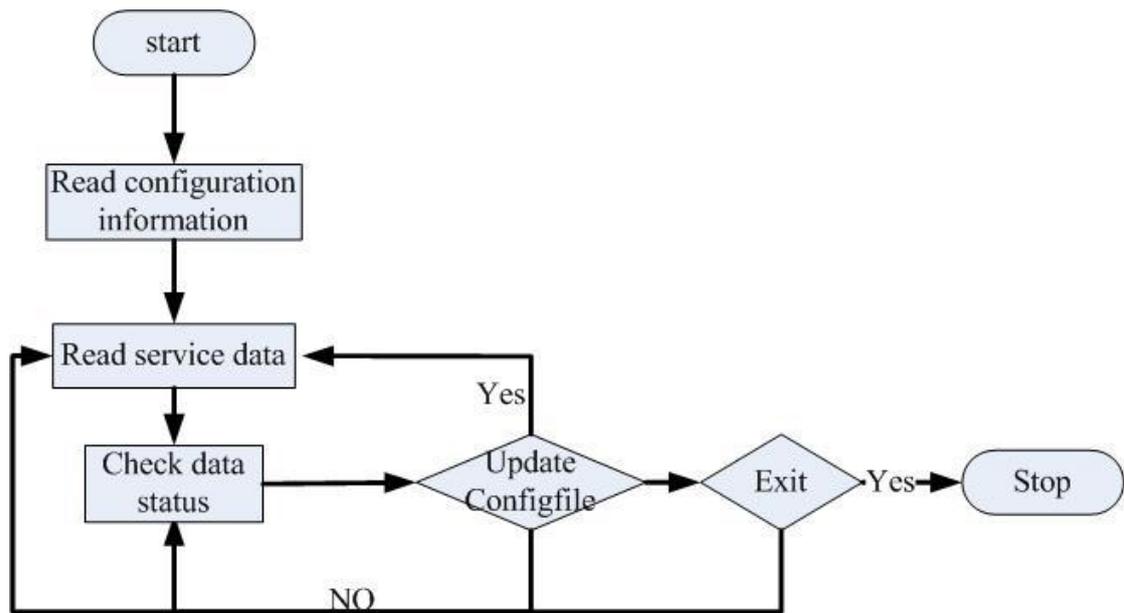


图 54 本地监控系统模块流程图

本地监控系统模块，首先要读取其相应的参数配置信息，其中包括了 DIM Service 的相关信息，以及物理量的参数名及其报警上下限等信息；在取得这些信息后开始读取 Service 数据，在此阶段如果接收到来自本地监控系统的配置文件更新命令，则需要重新读取相应的参数配置信息；因为此模块需要在几个状态间切换，所以此模块采用了状态机的设计模式。

在每次程序开始时，为了保证所读到的参数配置信息与本地监控系统一致，Read configuration information 需要从 svn 服务器去读取配置文件。考虑本地监控系统可能存在多种运行状态，每种运行状态都会对就一种参数配置信息文件，因此用一个独立的配置文件来存储此次启动时所启用的参数配置信息文件的名称。Read configuration information 的流程图如图 55 所示：

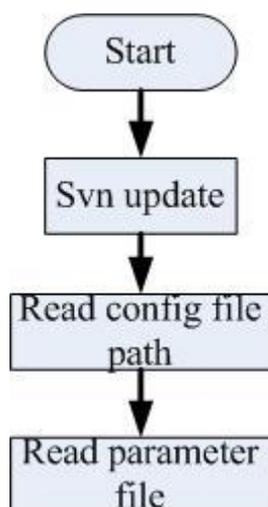


图 55 读配置文件流程

在读取配置文件时，首先将本地配置文件更新到 svn 服务器上最新的版本。然后读取存储参数配置文件路径的文件——configfilepath.XML，再通过这个路径去读取参数配置信息，并将参数信息转化为后面程序所需要的格式。

Read service data 是作为 DIM Client 读取来自 Service 的数据，包括物理参量数据以及本地监控软件的错误信息。其程序设计与温度监控软件的数据采集部分是相同的。Check data status 是对读取到的数据与其报警域值进行比较，判断数据的状态，并给出统一的报警格式，其报警格式如表 10 所示：

表 10 全局控制系统报警信息格式

Timestamp	Site	Main system	Subsystem	Parameter	Alarm status	Description

Update config file 是作为 DIM Command Service 接收来自本地监控系统的 DIM Command Client 的命令。当本地监控系统的参数配置文件更新并上传到 svn 服务器后，后向全局控制软件发布 DIM Command，通知其配置文件已经更新。

其程序流程图如图 56 所示：

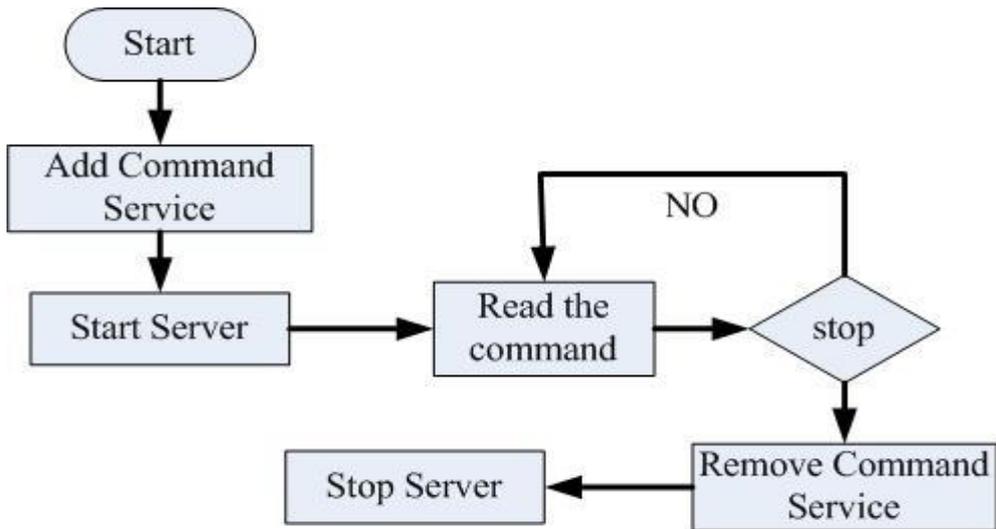


图 56 DIM Command Server 流程图

其程序框图如图 57 所示：

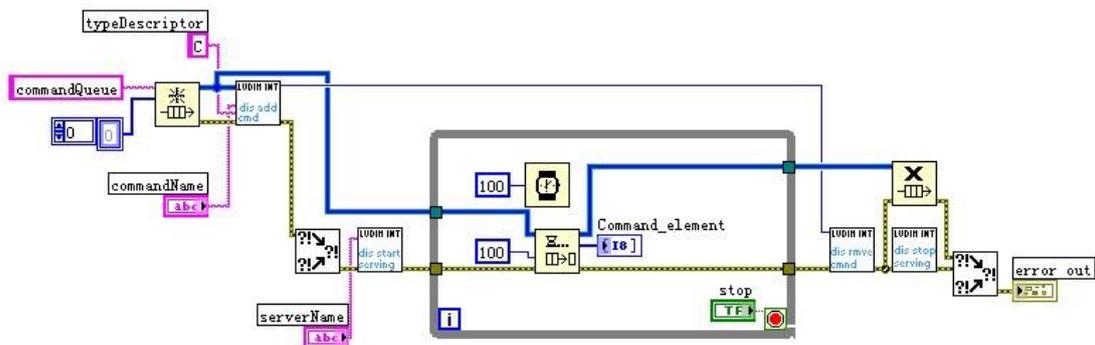


图 57 DIM Command Server 程序框图

首先创建一个队列来存放来自 DIM Command Client 的命令，然后将 commandName 添加到 Name Server，然后启动此 DIM Command Server，然后即可启动循环读取来自 Client 的命令，最后退出程序时移除此 Command Service 并停止此 Command Server。

2.5.1.2 配置信息模块

配置信息主要包括两部分：参数配置信息、系统配置信息。其中第一部分与本地控制系统的参数配置的功能相同，考虑到用户在本地和控制室都可以对软件进行配置，因此需要对本地和控制室的配置文件进行管理，使其保持一致；而第二部分，是针对全局控制软件的需要配置信息，如配置需要监控的探测器、软件启动时调用的界面等信息。

2.5.1.2.1 参数配置信息

为了使本地控制系统与全局控制系统的参数配置文件保持一致，SVN (Subversion, 版本管理工具) 被用来管理两地的文件。

SVN 是一个开源的版本控制系统[49]。SVN 会将文件存放在此中心版本库里，这个版本库就像一个文件服务器，只是它可以记录每一次文件的修改情况。因此 SVN 中的文件可以回复到以前的版本，并可以查看数据的更改细节，同时还允许用户对每一版本的文件增加描述信息。

大亚湾离线软件既采用了 SVN 对源码进行版本管理，因此合作组中的成员大多都可以使用 SVN。因此如果探测器控制系统使用 SVN 对配置文件进行版本管理，那么合作组中的成员可以非常方便的对配置文件进行查看以及更改。

本地控制系统与全局控制系统对配置文件的管理流程如图 58 所示：

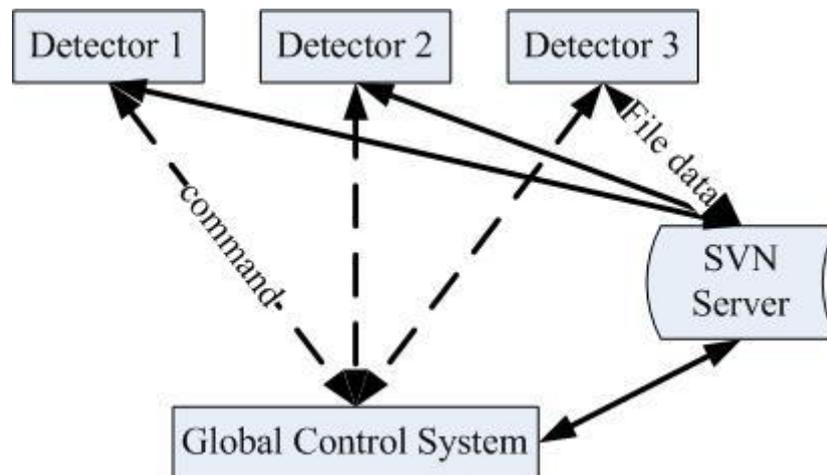


图 58 SVN 文件管理流程图

本地控制系统和控制系统在更改配置文件信息后将文件上传到文件服务器，同时向另一方发送命令通知其配置文件已经更新，另一方更新自己的配置文件；软件在初使化时检查服务器与本地文件的版本信息，如服务器上的文件已被更新过，则更新本地的配置文件。

SVN 提供了 Windows 系统下的命令行客户端[53]，LabVIEW 可以通过对此命令行客户端的调用来实现与 SVN 服务器的通讯。从 <http://subversion.apache.org/packages.html#windows> 下载 Win32SVN 后进行安装，然后在设置环境变量：系统变量/path 为 subversion 下面 bin 文件夹所在路径，最后重启电脑，然后 LabVIEW 就可以调用 SVN 命令行客户端了。

SVN 主要包括以下命令：

svn mkdir: 其参数为所需要创建的路径, 可以是 SVN 服务器或本地的;

svn checkout: 其参数是所要从服务器上下载的工作目录, 此命令不需要参数;

svn add: 在一个本地的工作目录中, 添加文件到服务器上的工作目录, 但并不上传文件, 其所需参数是要添加的文件名;

svn commit: 在执行完 svn add 命令之后, 用这个命令上传文件到服务器, 所需参数是要上传的文件名;

svn list: 在一个工作目录中, 用此命令显示 SVN 服务器上同一工作目录的文件列表, 此命令不需要参数;

svn update: 在一个工作目录中, 更新服务器上的文件到本地, 这个命令也不需要参数。

LabVIEW 中通过命令行调用的方式调用 SVN 命令客户端程序框图如图 59 所示:

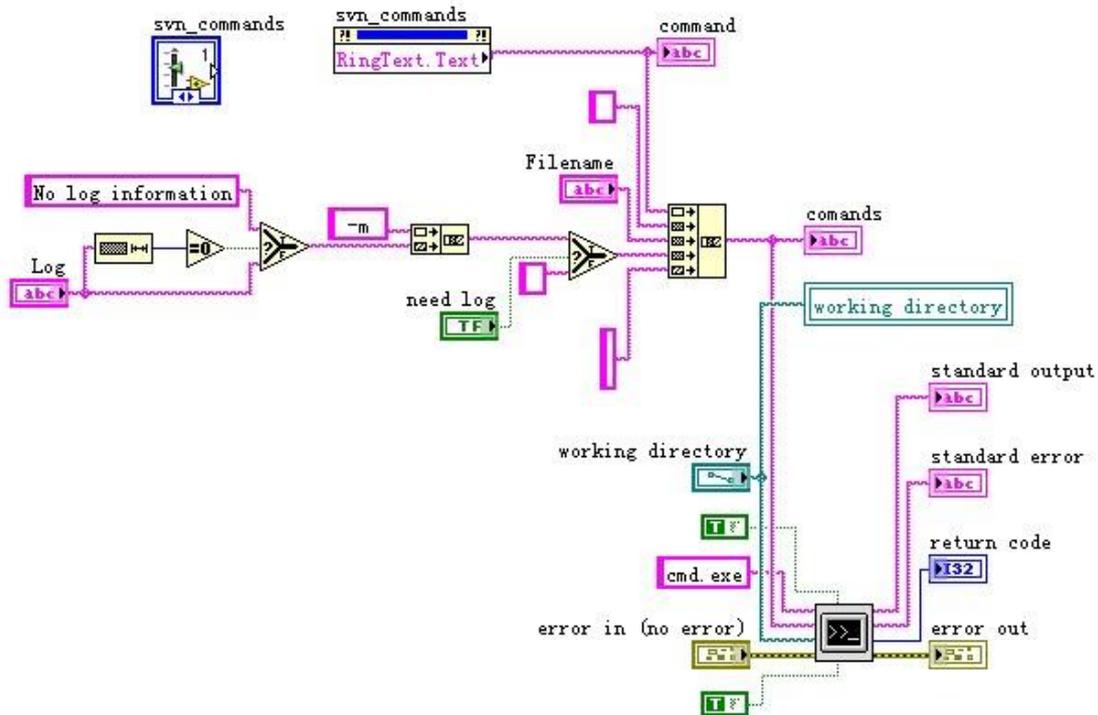


图 59 SVN 命令执行程序框图

其中 svn_commands 是一个枚举类型的变量, 可以方便用户调用各个命令。

在探测器控制系统中将会用到的几种文件管理方式为:

在服务器上建立工作目录: 首先用 svn mkdir 在 svn 服务器上建立工作目录,

然后再用 `svn checkout` 命令将这个工作目录下载到本地；

提交本地的文件到 `svn` 服务器：首次上传文件需要先通过 `svn add filename` 命令将文件添加到 `svn` 服务器，然后再用 `svn commit filename -m "log informaiton"` 命令提交文件到 `svn` 服务器；如果文件已经在 `svn` 服务器上了，就只需要使用 `svn commit filename -m "log informaiton"` 命令；

从 `svn` 服务器下载文件到本地：命令格式为 `svn update`；

查看 `svn` 服务器工作目录的文件列表：命令格式为 `svn list`。

2.5.1.2.2 系统配置信息

大亚湾探测器控制系统的探测器分布可以表示为如下几级：

1. 第一级——实验厅

DBNS：大亚湾近厅（1号厅）；

LANS：岭澳近厅（2号厅）；

FARS：远厅（3号厅）；

MIDS：4号厅；

LSH：液闪厅（5号厅）；

SAB：地面安装大厅等。

2. 第二级——主系统

AD：中微子探测器；

RPC：RPC 气体探测器；

IWP：内水池水切伦科夫探测器；

OWP：外水池水切伦科夫探测器等。

3. 第三级——子系统

HV：高压监控系统；

VME：VME 机箱监控系统；

TH：温湿度监测系统；

ADLid：AD 端盖监测系统；

Calibration：刻度系统；

CCD: CCD 监测系统。

考虑到各系统上述分布的特性符合树形结构的分布特点。每个子系统在全局控制系统中可能具有多个界面，其整体树形结构示意图如图 60 所示：

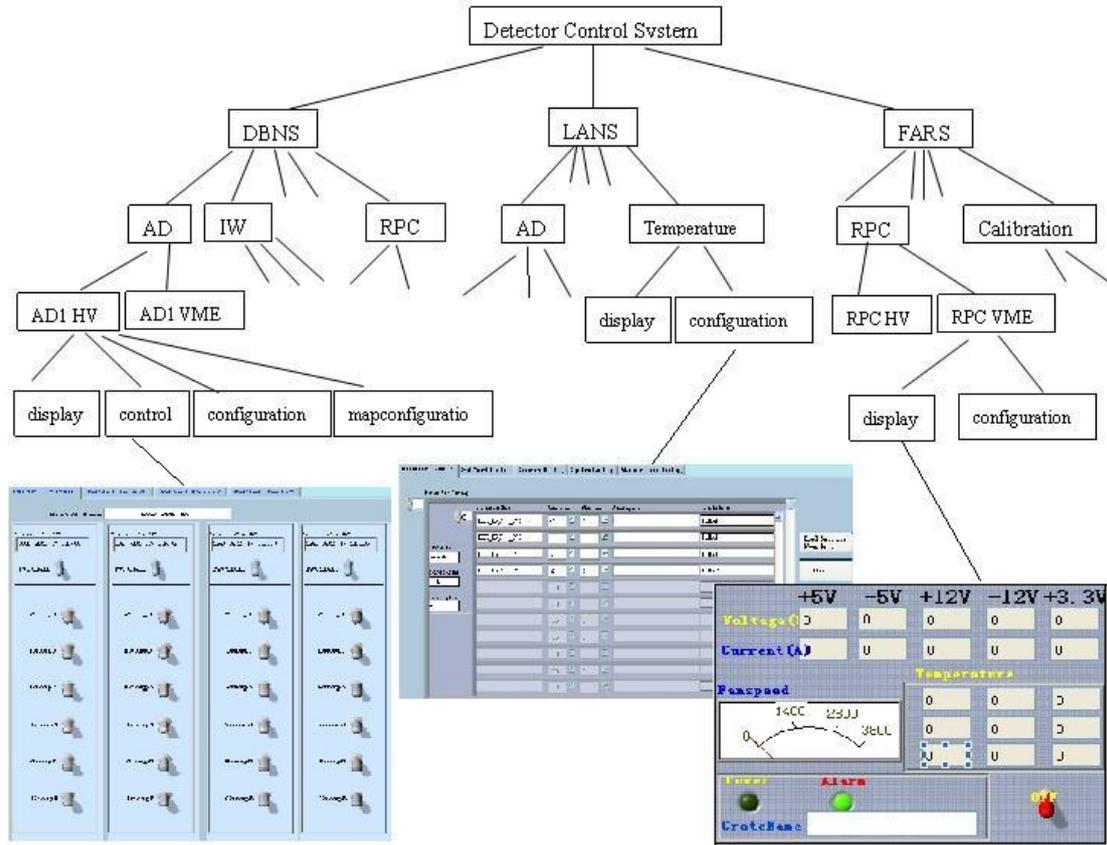


图 60 大亚湾全局控制系统界面树形管理

系统配置信息需要包含上述树形结构的全部信息。

2.5.1.3 界面显示

在主界面上提供了一个树表控件来显示系统配置信息中的树形结构信息，初始化程序负责将系统配置中树形结构信息赋值给此树形控件。

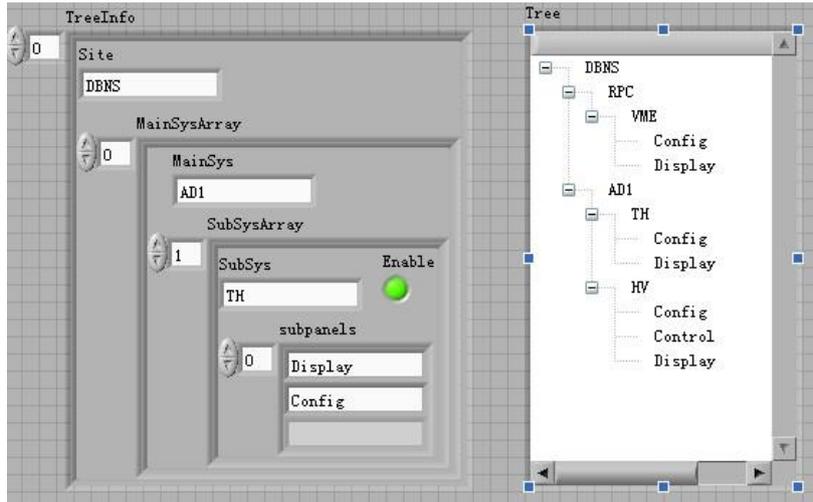


图 61 配置信息及树形控件显示

图 61 为树形结构的配置信息及其赋值到树形控件的结果，在配置信息中提供了子系统是否启用的选项。使用户可以选择加载哪些本地控制系统进行监控。

2.5.1.4 主程序

主程序是管理全局控制系统中各个模块的 VI，其程序流程图如图 62 所示：

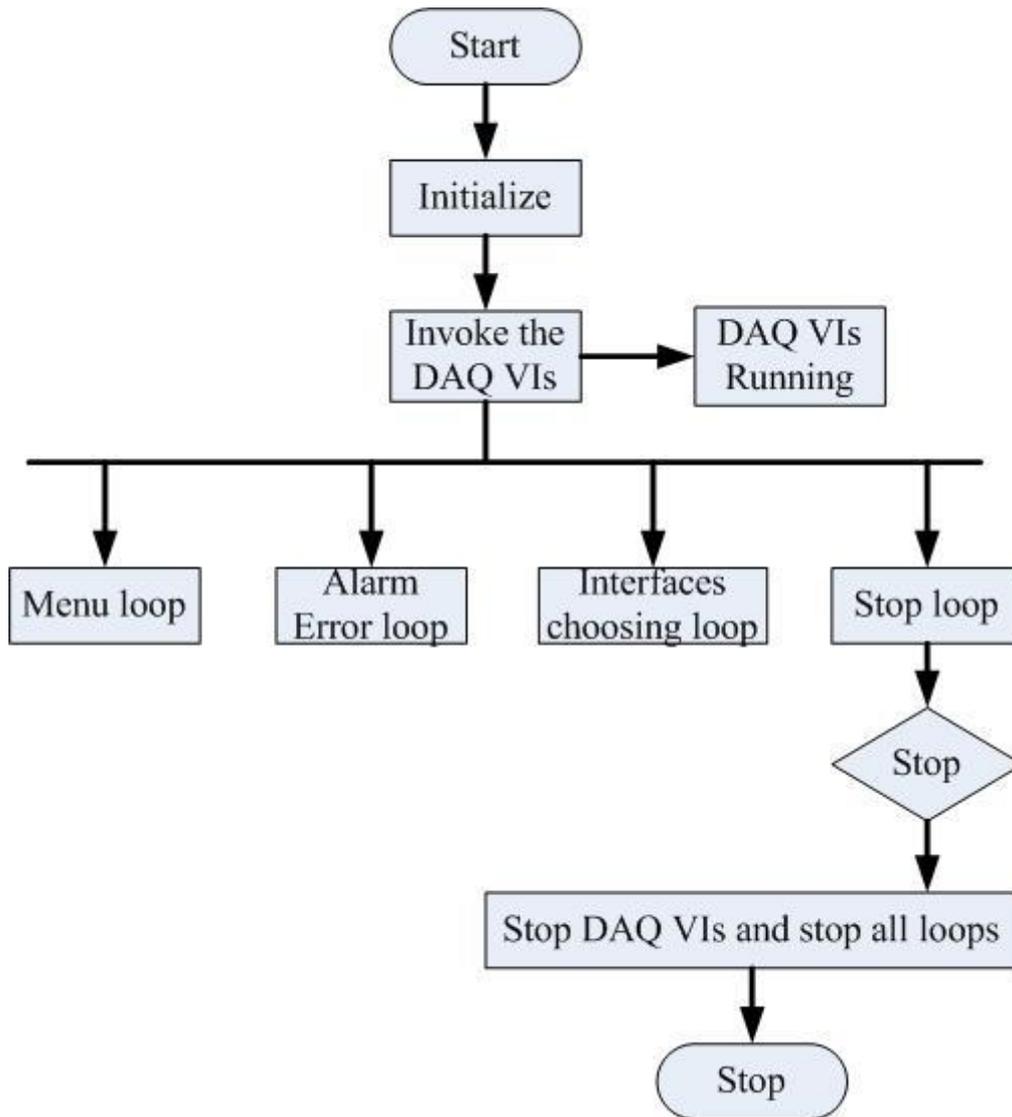


图 62 全局控制系统主程序流程图

初始化部分读取系统配置信息，为程序的各个部分提供所需信息：主要是读取一些参数配置文件，并将配置信息进行组合为程序其它部分需要的格式；

调用 the DAQ VIs: 启动配置的本地监控系统的 DAQ VI 和 DIM Command Server，接收来自本地监控和系统的命令；

DAQ VIs Running: 运行本地监控系统模块，接收来自本地监控系统通过 DIM Service 发布的数据，同时对数据进行报警判断；

Menu loop: 响应用户触发菜单的动作；

Alarm Error loop: 处理错误及报警信息的循环；

Interfaces choosing loop: 响应用户选择界面的操作；

Stop loop: 检查用户停止主程序的动作；

Stop DAQ VIs and stop all loops: 在程序结束前, 关闭所有循环以及所有 DAQ 模块。

2.5.1.5 主界面

全局控制系统主界面如图 63 所示:

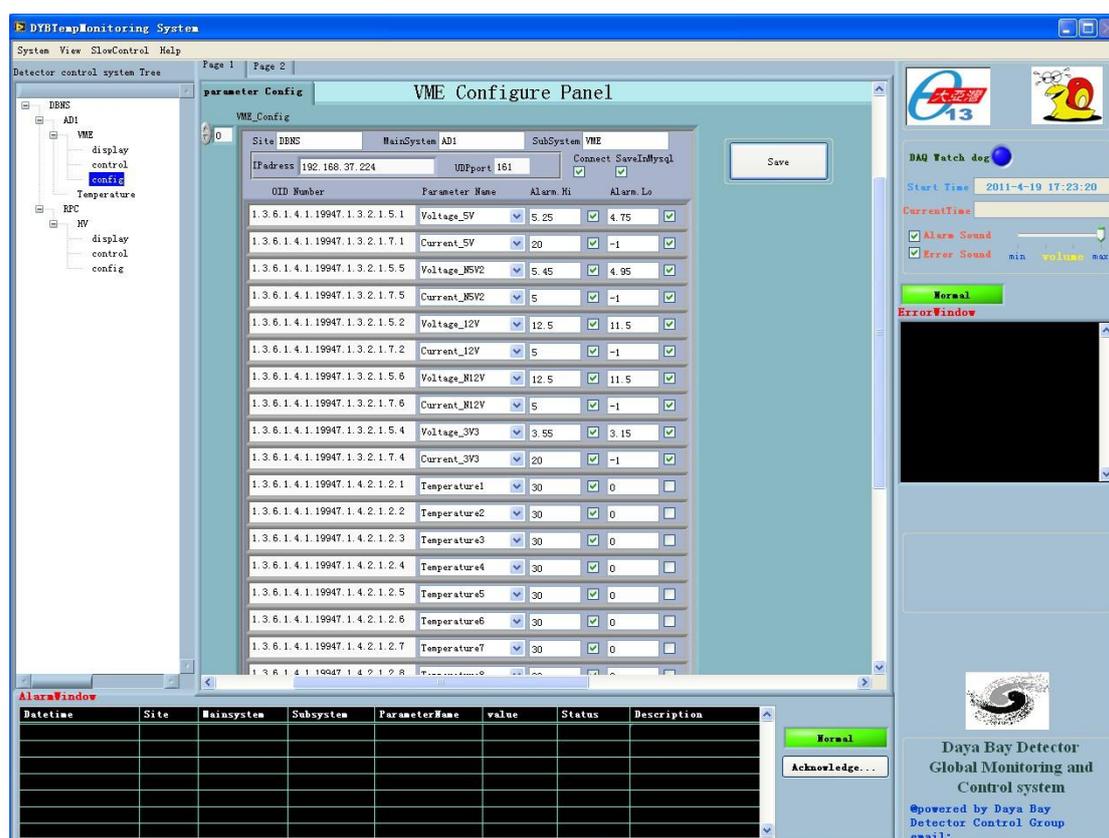


图 63 全局控制系统主界面

用户可以通过主界面左侧的树形控件来选择所要显示的内容, 如选择 DBNS/AD1/VME/config, 在右侧窗口将调用 DBNS_AD1_VME_config.vi, 然后用户可以对 VME 监控软件进行参数配置。

2.5.2 数据库存储服务器

数据库存储服务器采用了 linux 的服务器为硬件平台, 软件使用开源的 MySQL 数据库。

2.5.3 Web 数据查询服务器

Web 数据查询服务器是作为数据库查询的 Web 服务器。其查询界面如图 64

所示：

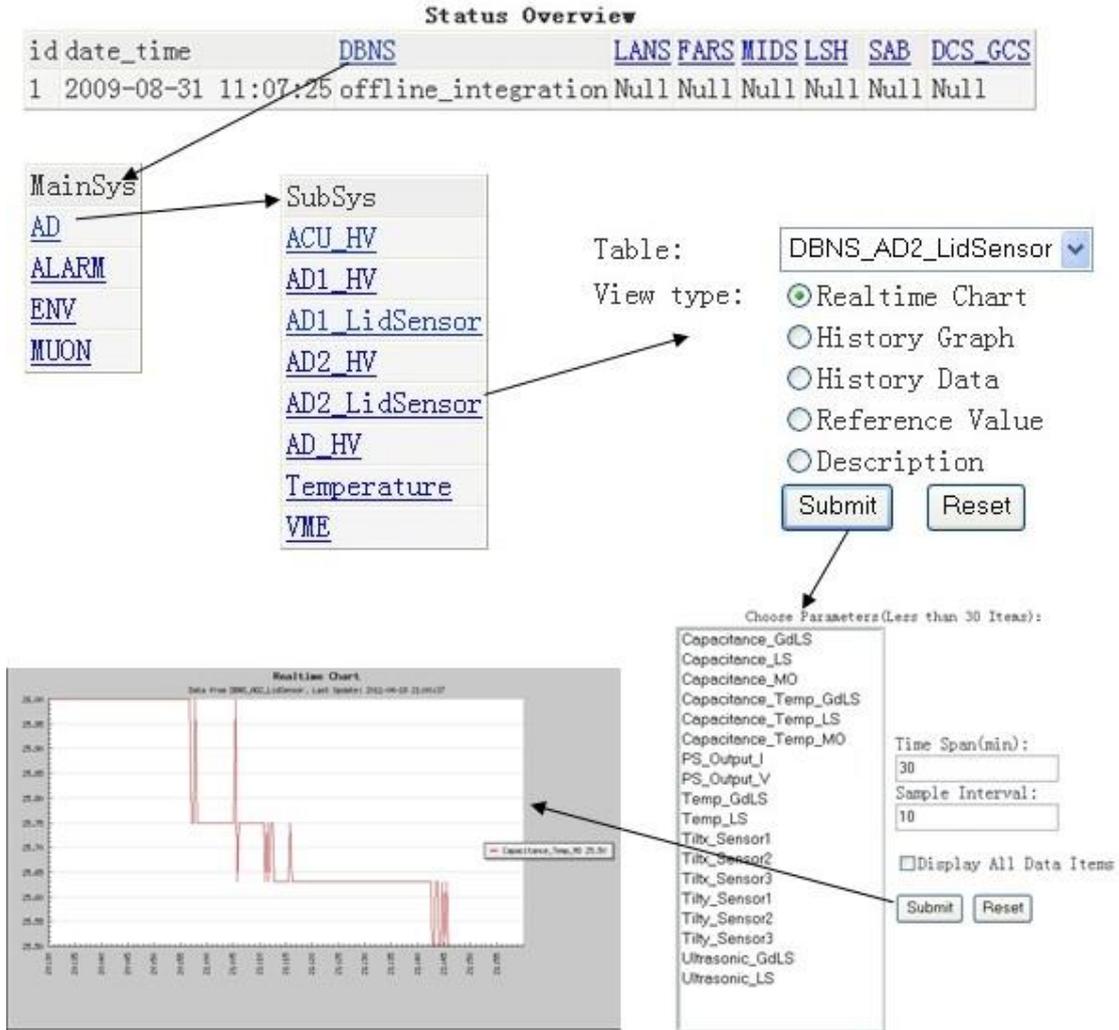


图 64 web 查询方式流程图

进入探测器控制系统网页查询主界面后，首先看到的是各个实验厅的链接，点击 DBNS 后；进入大亚湾近点的主系统界面；选择 AD 后进入 AD 探测器的子系统界面；然后选择 AD2_LidSensor 进入它的数据表查询界面，可以选择各种查询方式；这里先则了 Realtime Chart 查询方式，提交后进入了选择参数的界面；选择参数后提交即可显示这个参数的实时数据。

2.6 性能分析

大亚湾探测器控制系统满足了用户对探测器的监控需求，为大亚湾实验的运行提供了有力的保证。AD 在实验大厅安装时，探测器控制系统辅助完成了 Mini Dry Run, Dry Run 等多个实验，为 AD 的安装及调试做出了贡献。AD 进行液体灌装时，探测器控制系统对 AD 的液面高度进行了监测。探测器控制系统还辅助

完成了其他硬件设备的安装及调试，如 RPC、IW、OW 等。

探测器控制系统运行稳定，对所有的探测器的状态监控，为大亚湾中微子实验的正常运行提供坚实的基础。同时探测器控制系统的软件运行稳定，对于系统资源的占用有限，达到了设计的目标。图 65 是部分监控软件对 PC 资源的占用情况。图中左边是对网络资源的占用，可以看到平均只占用了 0.5%左右，右边是对 CPU 及内存的占用情况，对于 PC 的资源来说都是非常有限的。

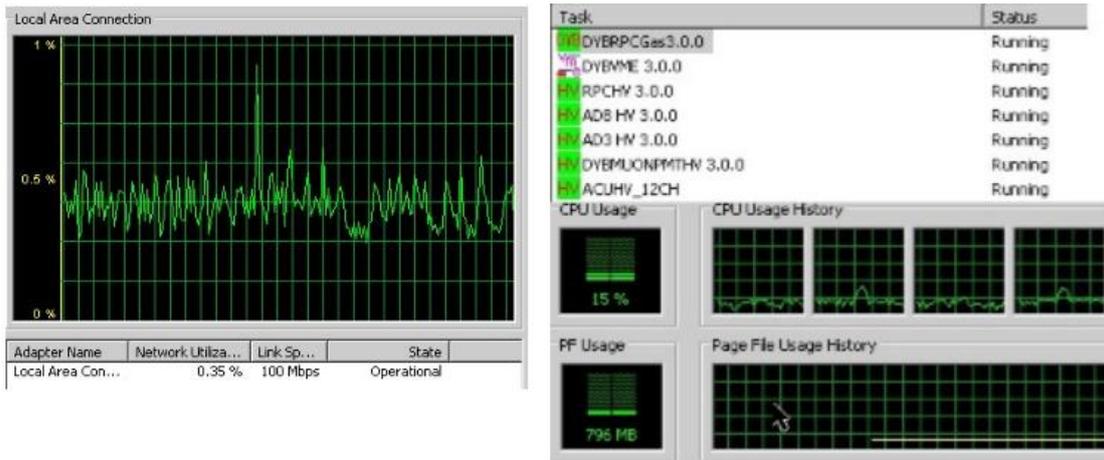


图 65 监控软件资源占用情况

大亚湾探测器控制系统完成达到了所有的设计目标，满足了实验人员对系统的各种需求。

2.7 总结及展望

大亚湾探测器控制系统，已经在多个实验中帮助实验人员完成了对探测器的监测和控制，并满足了实验人员的各种需求。在各个实验中，实验人员也根据具体使用提出了新的需求，而探测器控制系统也在最短的时间内进行了修改。可以说探测器控制系统在各个实验的完成中起到了重要的作用，为实验人员提供了及时可靠的监测信息，以及完成了对探测器的各种操作。探测器控制系统为大亚湾中微子实验对 θ_{13} 的测量在国际竞争中脱颖而出赢得了宝贵时间。

大亚湾探测器控制系统采用了 LabVIEW 作为其 SCADA 开发平台。针对大亚湾实验国际合作的特点，探测器控制系统的硬件由各个合作组成员开发，同时开发相应的数据采集及控制部分软件。LabVIEW 具有丰富的硬件接口，集成了丰富的函数库，使不具备软件开发经验的合作组成员节省了软件开发时间，也使各个子系统整合到探测器控制系统的框架中得到了简化。

考虑到大亚湾探测器本地控制系统与全局控制系统的通讯需求，即本地控制

系统将采集到的数据全部传送到全局控制系统，并且接收来自全局控制系统的命令，探测器控制系统使用了基于 Server/Client 的数据管理模式——DIM。DIM 作为一个实现了数据分布式管理的系统，并且具有跨平台的功能；非常适合于大亚湾探测器控制系统的需要。

LabVIEW 作为 SCADA 开发平台，加上 DIM 数据分布式管理系统，在开发探测器控制系统方面具有非常大的优势，可以应用在更为广泛的领域。

大亚湾探测器控制系统在使用中也存在一些可以更加完善的地方，如系统之中各模块之间的关系依然存在耦合，而在以后的改进之中，应该使各模块更加独立。

在将各子系统整合到探测器控制系统的框架中时，也遇到了很多问题。这些问题主要是由于各个子系统由不同合作组成员开发，其编程风格迥然不同，很难为其提出统一要求。因此在开发各个子系统的同时编写详细的文档变得非常重要，可以帮助实现整合的人员更加容易的理解程序，完成整合。

第 3 章 惰性中微子研究

在证实中微子振荡的实验中，核反应堆中微子实验起到了重要作用；核反应堆实验对惰性中微子研究仍有重要意义。本文将利用大亚湾反应堆中微子实验的数据对惰性中微子进行研究。

3.1 中微子振荡

中微子的振荡理论已经由各种中微子实验所证实，图 66 表示了中微子的振荡。中微子有三味本征态 ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ ；三个质量本征态 m_1 、 m_2 、 m_3 。三个质量本征态可以组成两个独立的质量平方差，其中 m_1 与 m_2 之间的质量平方差数据级在 10^{-5}eV^2 ， m_2 与 m_3 之间为 10^{-3}eV^2 。

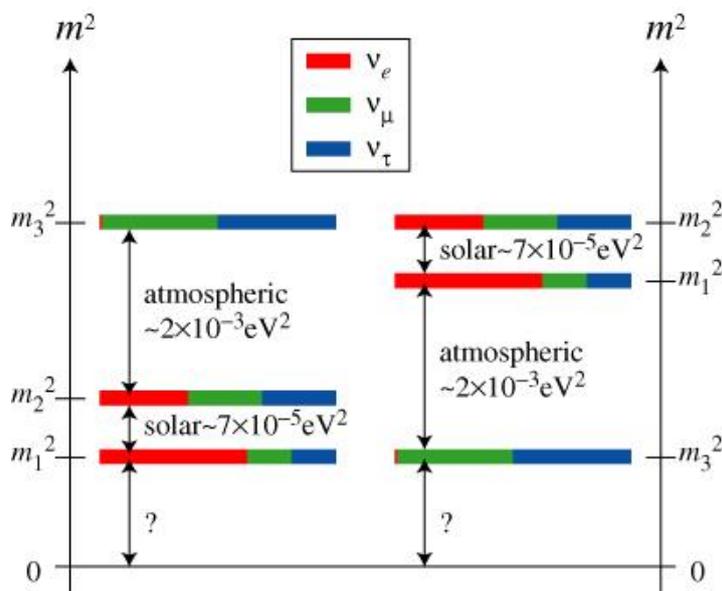


图 66 三代中微子振荡

3.2 惰性中微子简介

相对于三代中微子来说，惰性中微子是一种不参加弱相互作用，但是可以通过中微子振荡由其他中微子产生的中微子。1995 年，美国 LSND 实验（Liquid Scintillator Neutrino Detector）[31] 给出惰性中微子可能存在的证据。而 MiniBooNE 实验[32]分为两种模式：中微子模式和反中微子模式。在中微子模式下，其中微子振荡结果显示在 98% 的置信水平上与 LSND 实验结果不一致[54]；而 J. M. Conrad, C. M. Ignarra 等人引入了 3 味中微子加 2 味惰性中微子的模型，得到了 MiniBooNE 实验与 LSND 实验一致的结果[55]；在反中微子模式下，其

反中微子振荡结果又显示与 LSND 实验结果是一致的[54]。2011 年, G. Mention 与 M. Fechner 等人对以前的短基线核反应堆实验的数据进行了分析, 也找到了可能存在惰性中微子的证据[33]。

3.2.1 LSND 实验与 MiniBooNE 实验分析

LSND 实验与 MiniBooNE 实验只有两种中微子的振荡, 所以文献[54]中, 采用了一种简单的只有两个中微子的模型。两味中微子分别为 ν_e 和 ν_μ , 对应的质量本征态为 ν_1 和 ν_2 , 其混合矩阵是一个简单的旋转矩阵。当 $t = 0$ 时, 中微子可描述为:

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_2\rangle \quad (3.1)$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin\theta|\nu_1\rangle + \cos\theta|\nu_2\rangle \quad (3.2)$$

表达式中 θ 是混合角。由质量本征态传播的量子力学干涉, 可以得出振荡机率的公式为:

$$P = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27\Delta m^2(L/E)) \quad (3.3)$$

其中 θ 是混合角; L 是中微子产生点到探测点的距离, 单位为米; E 是中微子的能量, 单位为 MeV; $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$, 单位是 eV^2 , 是中微子质量平方差。

用公式 (3.3) 对 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 的存在机率拟合, 可以得到如图 67 的结果[54]。其中内部区域置信水平为 90%, 外部区域置信水平为 99%。图中也给出了 KARMEN 实验[56]的结果, 即图中虚线所示。KARMEN 实验没有观测到振荡信号, 只给出了一条置信水平为 90%的排除曲线, 排除了 LSND 实验的结果中的一部分。同样, 对 MiniBooNE 实验数据进行拟合, 结果也填入图 64。MiniBooNE 实验有两种模式, 所以图中分别给出了中微子模式和反中微子模式的结果。从图 64 可以看到, MiniBooNE 实验结果中, 中微子模式时, 在置信水平 95%的情况下观测到了振荡现象, 但比结果比 LSND 实验要低一些; 反中微子模式时, 在置信水平 99%的情况下观测到了振荡现象, 并且与 LSND 实验基本一致, 同时也与 KARMEN 实验的排除曲线保持了一致。

上述实验结果显示在 99%的置信度下, 对质量平方差 $\Delta m^2 \sim 1eV^2$ 时, 发现了振荡现象。而在当前中微子振荡现象中, ν_1 与 ν_2 之间的质量平方差为 $\Delta m_{21}^2 =$

$$(7.50 \pm 0.185) \times 10^{-5}eV^2, \nu_2 \text{ 与 } \nu_3 \text{ 之间质量平方差为 } \Delta m_{32}^2 = (2.47_{-0.067}^{+0.069}) \times$$

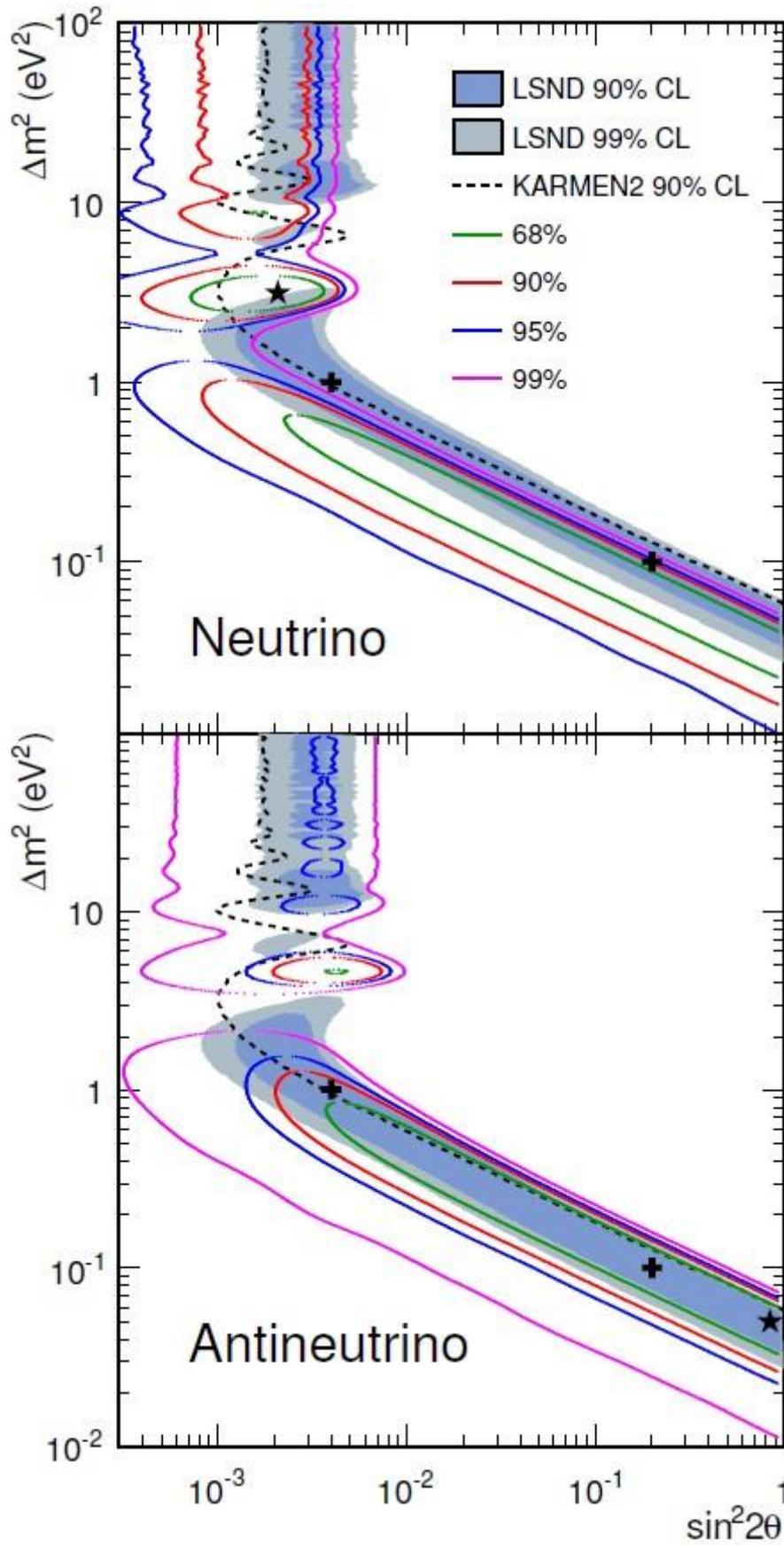


图 67 MiniBooNE 实验与 LSND 实验的 Δm^2 与 $\sin^2 2\theta$ 允许的范围

10^{-3}eV^2 。由于质量平方差相差几个数量级，所以应该是发现了一种新的中微子振荡。而在标准模型中只有三代活跃的中微子，所以需要引入一种惰性中微子来解释这种现象。

3.2.2 反应堆反中微子异常

2011年，G. Mention 与 M. Fechner 等人提出了反应堆反中微子异常的现象[33]。他们在发表的文章中首先对反应堆反中微子通量 ($\bar{\nu}/\text{fission}$) 进行了重新计算。采用的中子寿命从以前的 926 秒[57]更新到了现在的 PDG 平均值 885.7 秒[58]，进而重新计算了反应截面，使这个值提高了 0.37%[33]。接着引入了新的反应堆反中微子谱[59]，归一化后，反应堆中四种裂变元素 U-235、Pu-239、Pu-241、U-238 预期的反中微子计数分别增加了 2.5%、3.1%、3.7%、9.8%。以前的计算方法采用一种基于 30 种有效 β 分支的模型[60]，新的方法则考虑了数千种裂变产物的衰变过程[61]。新的计算结果使中微子通量增加了 3.5%[33]。在引入新的中微子通量后，对以前实验中的中微子的探测值与期望值之比进行重新计算得到表 12 的结果[33]。从表 11 中可以很明显的看出，在引入了新的中微子谱后，中微子探测值与期望值之比比以前降低了，偏离 1 更大。

表 11 基于新旧计算方法的中微子探测值与期望值之比

#	result	Det. type	τ_n (s)	^{235}U	^{239}Pu	^{238}U	^{241}Pu	old	new	err(%)	corr(%)	L(m)
1	Bugey-4	$^3\text{He} + \text{H}_2\text{O}$	888.7	0.538	0.328	0.078	0.056	0.987	0.942	3.0	3.0	15
2	ROVNO91	$^3\text{He} + \text{H}_2\text{O}$	888.6	0.614	0.274	0.074	0.038	0.985	0.940	3.9	3.0	18
3	Bugey-3-I	$^6\text{Li} - \text{LS}$	889	0.538	0.328	0.078	0.056	0.988	0.946	4.8	4.8	15
4	Bugey-3-II	$^6\text{Li} - \text{LS}$	889	0.538	0.328	0.078	0.056	0.994	0.952	4.9	4.8	40
5	Bugey-3-III	$^6\text{Li} - \text{LS}$	889	0.538	0.328	0.078	0.056	0.915	0.876	14.1	4.8	95
6	Goesgen-I	$^3\text{He} + \text{LS}$	897	0.620	0.274	0.074	0.042	1.018	0.966	6.5	6.0	38
7	Goesgen-II	$^3\text{He} + \text{LS}$	897	0.584	0.298	0.068	0.050	1.045	0.992	6.5	6.0	45
8	Goesgen-II	$^3\text{He} + \text{LS}$	897	0.543	0.329	0.070	0.058	0.975	0.925	7.6	6.0	65
9	ILL	$^3\text{He} + \text{LS}$	889	≈ 1	—	—	—	0.832	0.802	9.5	6.0	9
10	Krasn. I	$^3\text{He} + \text{PE}$	899	≈ 1	—	—	—	1.013	0.936	5.8	4.9	33
11	Krasn. II	$^3\text{He} + \text{PE}$	899	≈ 1	—	—	—	1.031	0.953	20.3	4.9	92
12	Krasn. III	$^3\text{He} + \text{PE}$	899	≈ 1	—	—	—	0.989	0.947	4.9	4.9	57
13	SRP I	Gd-LS	887	≈ 1	—	—	—	0.987	0.952	3.7	3.7	18
14	SRP II	Gd-LS	887	≈ 1	—	—	—	1.055	1.018	3.8	3.7	24
15	ROVNO88-1I	$^3\text{He} + \text{PE}$	898.8	0.607	0.277	0.074	0.042	0.969	0.917	6.9	6.9	18
16	ROVNO88-2I	$^3\text{He} + \text{PE}$	898.8	0.603	0.276	0.076	0.045	1.001	0.948	6.9	6.9	18
17	ROVNO88-1S	Gd-LS	898.8	0.606	0.277	0.074	0.043	1.026	0.972	7.8	7.2	18
18	ROVNO88-2S	Gd-LS	898.8	0.557	0.313	0.076	0.054	1.013	0.959	7.8	7.2	25
19	ROVNO88-3S	Gd-LS	898.8	0.606	0.274	0.074	0.046	0.990	0.938	7.2	7.2	18

图 68 列出了表 11 中短基线反应堆实验的结果[33]。

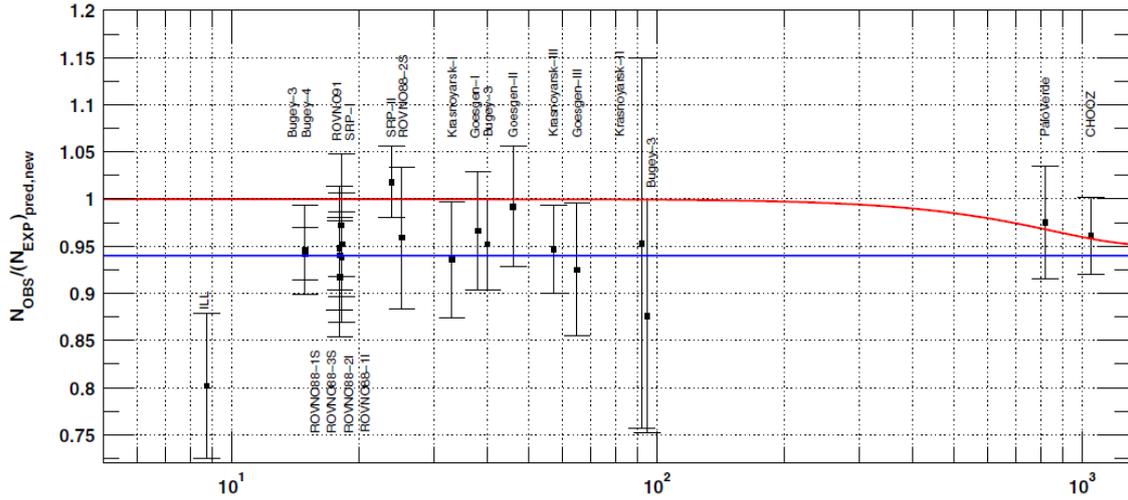


图 68 短基线反应堆反中微子异常

纵坐标为中微子探测值与期望值的比值，横坐标为探测器到反应堆的距离。红线表示了一种 3 味中微子混合的结果，这里假设 $\sin^2(2\theta_{13})=0.06$ 。考虑到可能的相关性，平均的比值是 0.943 ± 0.023 ，与期望值相差 5.7%，这种情况被称为反应堆反中微子异常。蓝线表示了包含一种新中微子的 4 味中微子混合的结果，这里假设 $|\Delta m_{\text{new,R}}^2| \gg 1\text{eV}^2$ ， $\sin^2(2\theta_{\text{new,R}})=0.12$ （后面反应堆中微子实验中的最好的拟合结果）。如果这种亏空是由于中微子振荡产生的，那么就需要一种中微子，它的 $|\Delta m_{\text{new}}^2| \geq 1\text{eV}^2$ ，它的混合角 $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) \approx 0.115$ 。

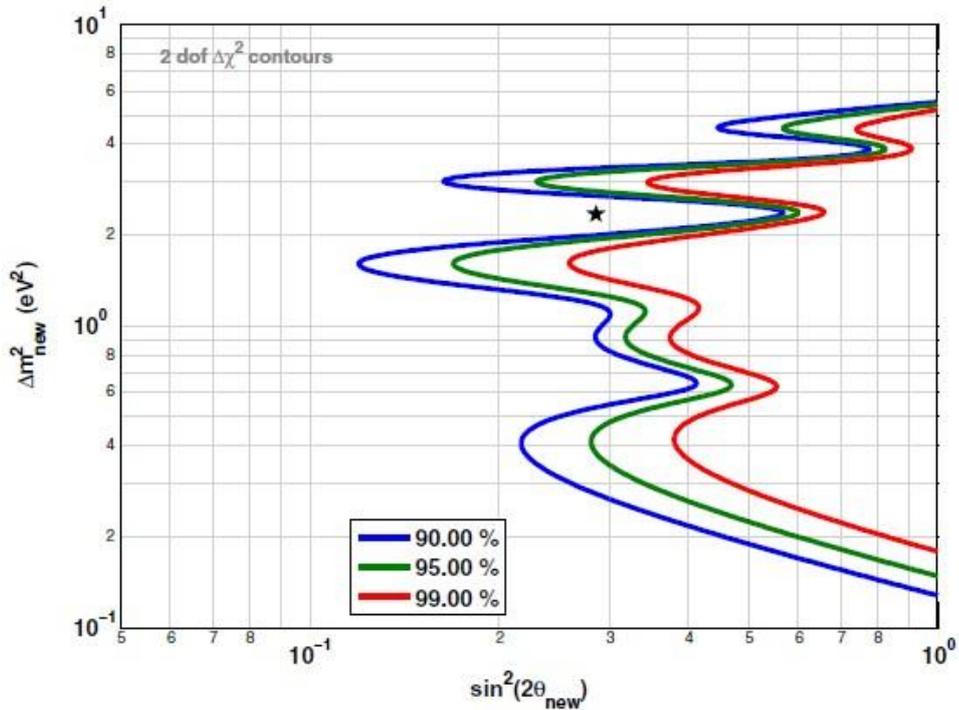


图 69 ILL 实验的 $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) - \Delta m_{\text{new}}^2$ 排除区域

图 69[33]是 ILL 实验的 $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) - \Delta m_{\text{new}}^2$ 排除区域的二维图。这里只对 ILL 实验的能谱波形进行了拟合。图中星号指出了最佳拟合值，但是由于很弱的统计性意义，并且显示在 1σ 水平上不存在振荡，这个拟合值置信度不高。

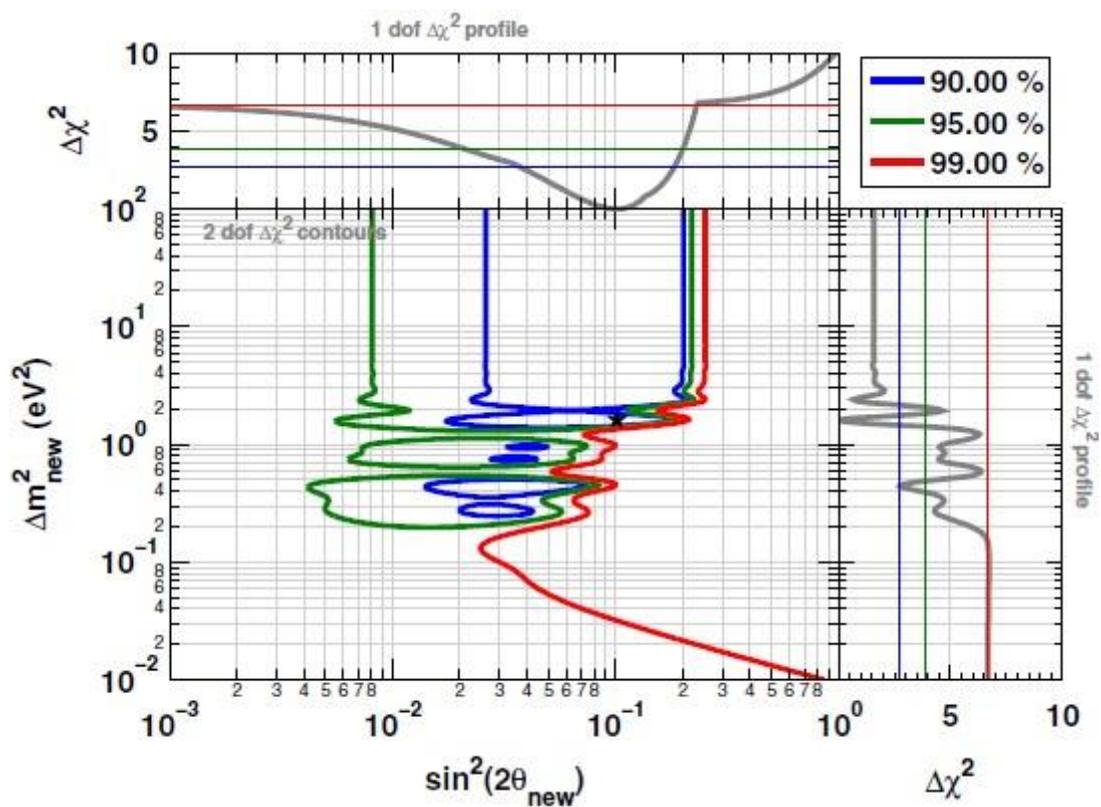


图 70 $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) - \Delta m_{\text{new}}^2$ 允许区域

图 70[33]的结果综合考虑了前面提到的反应堆中微子实验的数据，不包含 ILL 实验的谱形信息，但是考虑了 Bugey-3 的数据，其基于 40m/15m 的比例对 3+1 的中微子假说有很强的限制，这里假设 $\sin^2(2\theta_{13}) = 0$ 。最佳拟合值在图中用星号指出。

由图 70 可以得出，在 95% 的置信水平上，是存在一种新的中微子的。而且由于这种中微子的 $\Delta m_{\text{new}}^2 > 1\text{eV}^2$ ，这与 LSND 实验和 MiniBooNE 实验的结果是一致的，也需要一种标准模型之外的第四种中微子来解释这种振荡现象。

3.3 大亚湾中微子振荡分析

3.3.1 大亚湾反应堆中微子实验

大亚湾反应堆中微子实验的物理目标是精确测量中微子振荡的混合角 θ_{13} ，2012 年 3 月 8 日，大亚湾合作组首次发布了物理分析结果，证明在 5 倍标准偏

差下 $\sin^2(2\theta_{13})$ 不为 0，从而首次发现了这种新的中微子振荡[62]。2014 年，大亚湾合作组发表的文章[63]给出了最新的物理分析结果，只考虑事例率分析得到 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.090 \pm 0.010$ ；事例率加谱形分析得到 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.008$ 。

大亚湾实验中核反应堆与探测器的布局图如图 71 所示。大亚湾核电站共有三个堆群，六个反应堆，总功率为 17.4GW。其中大亚湾反应堆标记为 D1，D2；岭澳一期为 L1，L2；岭澳二期为 L3，L4。探测器共有 8 个，本文中的分析数据用到其中 6 个，所以只标明了这 6 个探测器。分别为大亚湾近点 EH1 的 AD1，AD2；岭澳近点 EH2 的 AD3；远点 EH3 的 AD4，AD5，AD6。表 13 给出了各探测器到核反应堆的基线长度，单位为米。

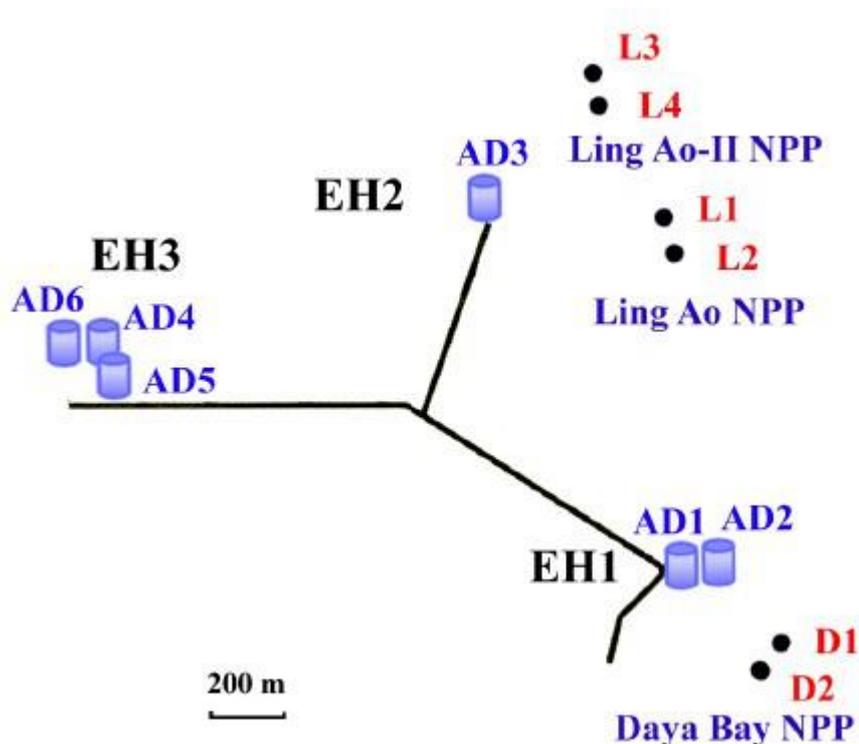


图 71 大亚湾实验中核反应堆与探测器的布局图

表 12 各探测器到反应堆的基线

	D1	D2	L1	L2	L3	L4
AD1	362	372	903	817	1354	1265
AD2	358	368	903	817	1354	1266
AD3	1332	1358	468	490	558	499
AD4	1920	1894	1533	1534	1551	1525
AD5	1918	1892	1535	1535	1555	1528
AD6	1925	1900	1539	1539	1556	1530

其中远点尽量放在了振荡极大处，而近点则与反应堆尽量接近以减小振荡。

在三味中微子在真空中混合的理论框架下，能量为 E 的电子反中微子 $\bar{\nu}_e$ 在距离 L 上被检测为 $\bar{\nu}_e$ 的机率可用下式表示[75]

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta_{21} - \sin^2 2\theta_{13} (\cos^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{31} + \sin^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{32}) \quad (3.4)$$

其中 $\Delta_{ji} \equiv 1.267 \Delta m_{ji}^2 (\text{eV}^2) [L(\text{m}) / E(\text{MeV})]$ ，而 Δm_{ji}^2 是质量本征态 ν_j 和 ν_i 的质量平方差。因为 $\Delta m_{21}^2 \ll |\Delta m_{31}^2| \approx |\Delta m_{32}^2|$ [64]，短基线核反应堆电子反中微子振荡主要取决于 Δ_{3i} ，而且可以很自然的得出质量平方差的一个组合 $\sin^2 \Delta_{ee} \equiv \cos^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{31} + \sin^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{32}$ [65]。

在本文中使用 θ_{12} 混合角为 $\sin^2 2\theta_{12} = 0.857 \pm 0.024$ ，质量平方差 $\Delta m_{21}^2 = (7.50 \pm 0.20) \times 10^{-5} \text{eV}^2$ [64]。

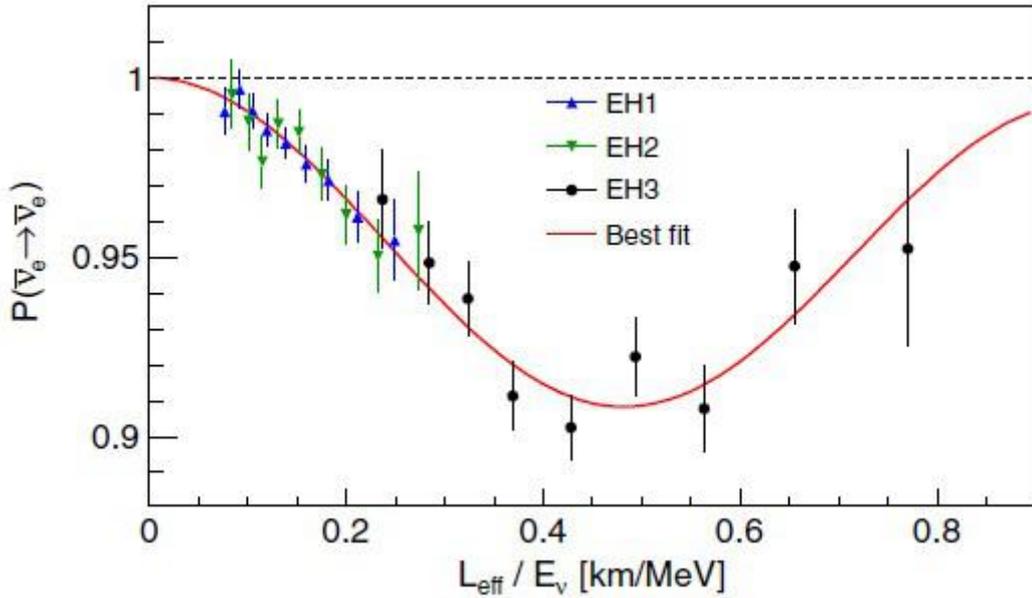


图 72 电子反中微子存在机率随中微子传播距离与能量比值的变化

可以得到混合角 θ_{13} 的最佳拟合值 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.090_{-0.009}^{+0.008}$ ，质量平方差最佳拟合值 $|\Delta m_{ee}^2| = (2.59_{-0.20}^{+0.19}) \times 10^{-3} \text{eV}^2$ [63]。

使用上述最佳拟合值，利用公式 (3.4) 可以得到电子反中微子的存在机率，再与实验数据对比，得到如图 72 所示的结果。我们可以很明显的看到短基线核反应堆电子反中微子的振荡现象。图中横坐标是反中微子传播距离 L 与其能量 E_0 的比值。对于每个实验厅，将多个核反应堆的振荡通量转化为一个有效的单个基线长度的振荡通量，这个基线长度就是有效的探测器到反应堆的距离 L_{eff} 。

从图 72 中可以很明显的看出，大亚湾的数据，尤其是近点的数据对 L/E 从 $0.05-0.25\text{Km/MeV}$ 的区域能产生很好的约束，这个区域对应的 $|\Delta m^2|$ 在 10^{-3} 到 10^{-1}eV^2 之间。如果存在一种惰性中微子的话，上图中将会产生一个额外的振荡周期。

3.3.2 大亚湾中微子振荡 3+1 模型

在包含 n 味中微子的情况下，中微子混合矩阵将有 $n(n-1)/2$ 个混合角， $(n-1)(n-2)/2$ 个 Dirac 位相，还可能有 $(n-1)$ 个 Majorana 位相。对于 3 味中微子加 1 味惰性中微子的模型，需要 6 个混合角和 3 个 CP 破坏位相。在电子反中微子的消失中，3 个 CP 破坏位相无法观测到。3 个额外的混合角一般标记为 θ_{24} ， θ_{34} 和 θ_{14} 。这里我们选择了参考文献 [66] 中的一个参数化中微子混合矩阵来简化电子反中微子的振荡机率。参数化后的中微子振荡矩阵 U 表示如下：

$$U = R_{23} \times R_{24} \times R_{34} \times R_{14} \times R_{13} \times R_{12}, \quad (3.5)$$

这里 R_{ij} 表示一个在 (i, j) 平面的 44 旋转。 R_{24} ， R_{34} 和 R_{14} 中分别包含了前面提到的 3 个新的混合角： θ_{24} ， θ_{34} 和 θ_{14} 。在这种参数化下，表达式 (3.5) 中只有后面的三项对 U 中的第一行有贡献：

$$U_{e1} = \cos\theta_{14}\cos\theta_{13}\cos\theta_{12} \quad (3.6)$$

$$U_{e2} = \cos\theta_{14}\cos\theta_{13}\sin\theta_{12} \quad (3.7)$$

$$U_{e3} = \cos\theta_{14}\cos\theta_{13} \quad (3.8)$$

$$U_{e4} = \sin\theta_{14} \quad (3.9)$$

完整的反电子中微子在真空中的振荡机率，只依赖于 U 的第一行，其表达式可以写成如下所示：

$$\begin{aligned}
P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = & 1 - 4|U_{e1}|^2|U_{e2}|^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right) \\
& - 4|U_{e1}|^2|U_{e3}|^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right) \\
& - 4|U_{e2}|^2|U_{e3}|^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right) \\
& - 4|U_{e1}|^2|U_{e4}|^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right) \\
& - 4|U_{e2}|^2|U_{e4}|^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{42}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right) \\
& - 4|U_{e3}|^2|U_{e4}|^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{43}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right) \tag{3.10}
\end{aligned}$$

当 $\theta_{14} = 0$ 时上面振荡机率公式将恢复成 3 味中微子模型时的振荡机率公式。

根据大亚湾实验每个实验厅的基线长度和反中微子能量，利用表达式(3.10)可以得到反电子中微子振荡机率随基线长度与中微子能量比值(L/E)的变化曲线，图 73 所示黑线即 3+1 中微子振荡模型的变化曲线，此处取 $\sin^2 2\theta_{14} = 0.02$ ， $\Delta m_{41}^2 = 0.03$ 。图中红线是大亚湾的数据的最佳拟合曲线，当 $\sin^2 2\theta_{14}$ ， m_{41}^2 都取 0 时，3+1 味中微子振荡将回到 3 味中微子模型的情况。由于大亚湾近点两个探测器的数据对就 L/E 范围为 0.05 到 0.2km/Mev，其对应的 Δm^2 为 0.001 到 0.1eV²，所以大亚湾实验能对此 Δm^2 范围对应的 $\sin^2 2\theta_{14}$ 给以很好的限制。

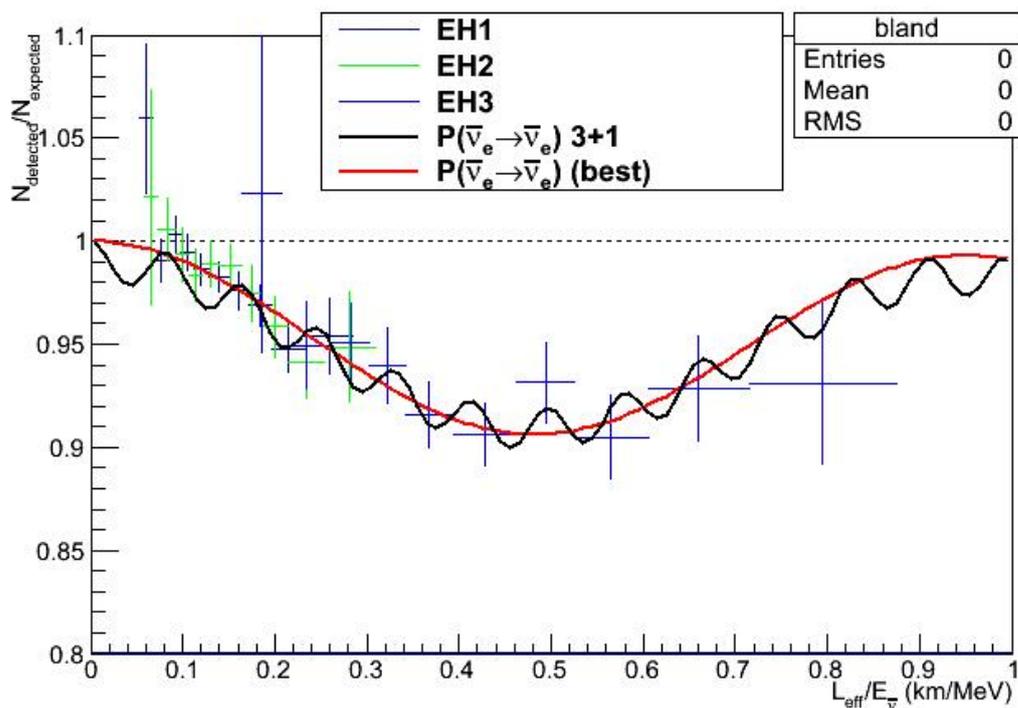


图 73 3+1 中微子模型电子反中微子存在机率随 L/E 的变化走势

3.4 大亚湾反应堆反中微子实验惰性中微子分析

3.4.1 大亚湾实验数据及 IBD 挑选

本文中使用的的大亚湾数据是从 2011 年 12 月 24 日到 2012 年 7 月 28 日，共 217 天的数据，与文献[63]所用的数据集一样。

反电子中微子通过在掺钷液闪中的反 β 衰变(Inverse Beta Decay,IBD), $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, 来探测。其中 e^+ 会产生一个快速的快闪烁信号，而 n 被钷俘获后会产生一个慢信号，这两个信号的符合就是一个独特的 $\bar{\nu}_e$ 信号特征。

IBD 事例的挑选首先排除了两种本底。AD 中的少量 PMT(photomultiplier tube)由于基座放电会自发的发光，这类的仪器本底称为 flasher events。第一步就是将 flasher events 排除。第二步是通过 AD 触发的时间窗口选择对 muon 本底的排除。当一个信号在内水池或外水池的 NHIT (击中 PMT 计数)12 时，我们称这个信号为 μ_{ws} (water shield muon)。水池中所有 AD 都会排除这个信号之前 $2\mu s$ 到其后 $200\mu s$ 时间窗口内的事例，为了避免不同探测器之间的时间校正问题，所以排除时间提前了 $2\mu s$ 。在 μ_{ws} 信号产生的 $2\mu s$ 内，如果 AD 中的事例能量大于

20MeV 或 2.5GeV, 分别称为 AD muons(μ_{AD})或 showering muons(μ_{sh})。这类事例则需要更长的时间窗口以排除宇宙线本底。

IBD 中快信号的能量 E_p 需要在 0.7MeV 到 12.0MeV 之间, 而慢信号的能量 E_d 需要在 6.0MeV 到 12.0MeV 之间。慢信号与快信号的时间差 $\Delta t = t_d - t_p$ 需要在 1 到 200 μ s 之间, t_p 和 t_d 是快信号和慢信号产生的时间。同时, 在 t_p 之前 200 μ s, t_d 之后 200 μ s, 以及 t_p 与 t_d 之间不能有大于 0.7MeV 的信号, 排除偶然符合本底。

同样的, 当 $-2 < t_d - t_{\mu WS} < 600\mu$ s, $0 < t_d - t_{\mu WS} < 1000\mu$ s(AD Muon), 或者 $0 < t_d - t_{\mu WS} < 1$ s(AD showering muon) 时, 快慢信号对将会作为本底被排除 [79], 排除 muon 产生的次级粒子的影响。

3.4.2 大亚湾实验相关误差输入

大亚湾反应堆中微子实验的系统误差包括: 测量能谱修正、本底、反应堆和探测器。因为分析中用到了实验数据事例率和谱形信息来得到最终结果, 所以系统误差也要考虑事例率和谱形相关的误差。

3.4.2.1 测量能谱修正与本底及其误差

大亚湾实验中的测量能谱由于探测器非线性的原因, 需要进行非线性修正, 这将引入误差。实验主要有 5 种本底: 偶然符合本底, 快中子本底, ${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$ 本底, Am-C 源本底和 Alpha-n 本底, 这些本底也会引入误差。

(1) IBD 能谱修正

大亚湾 AD 探测器中使用的是液闪, 而液闪的能量响应是非线性的。[83]中对能谱的非线性修正进行了详细分析, 最终引入了四个参数 p_0, p_1, p_2, p_3 来表示非线性的误差。非线性模型包括一个 nominal 的曲线和四种其他可能的曲线, 在中微子能谱振荡拟合中的非线性模型可以是这五条曲线的组合, 所以在拟合中引入了四个自由参数。

(2) 偶然符合本底

前文提到 IBD 事例的挑选是通过一个快信号与一个慢信号的符合来实现。如

果两个不相关的信号正好符合了这些挑选条件,那么这两个信号就形成了一个偶然符合本底。其中快信号主要是天然放射性事例,而慢信号主要是宇宙射线、刻度源产生的中子触发的事例。偶然符合本底事例率可以通过理论计算方法, off-window 方法以,利用快慢信号距离分布的估计方法来得到[68]。大亚湾合作组在发表的文章[63]中采用了通过理论计算方法得到的本底事例率和误差(个/天),AD1为 9.68 ± 0.10 ,AD2为 9.46 ± 0.10 ,AD3为 7.49 ± 0.08 ,AD4为 2.98 ± 0.03 ,AD5为 2.91 ± 0.03 ,AD6为 2.85 ± 0.03 ,系统误差保守估计为1%[68]。文献[68]中主要利用三种方法来得到偶然符合本底的能谱,如图69所示。考虑到统计量优势,最终采用了图74中的单事例能谱作为偶然符合本底的能谱,并忽略了谱形的系统误差。

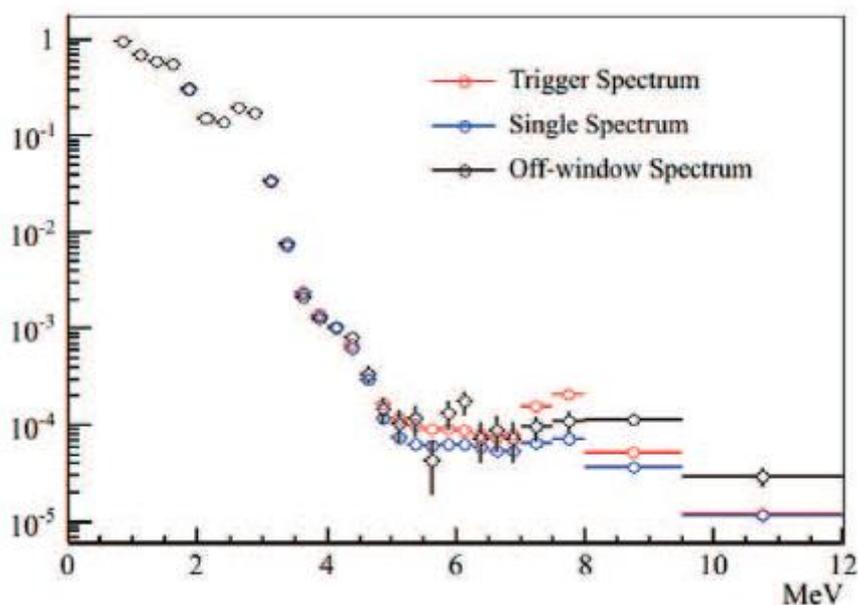


图 74 偶然符合本底能谱

(3) 快中子本底

快中子本底是与宇宙线 muon 相关的一种本底。这是把动能较大的中子称为快中子,其动能一般大于 5MeV。当宇宙线 muon 打到探测器周围的物体时,就可能产生快中子。当快中子进入 AD 后,通过与质子碰撞将部分动能传递给质子,质子的能量迅速沉积形成快信号;而慢化后的中子被 Gd 俘获后形成慢信号。可以看出,这个过程与 IBD 事例快慢信号的过程非常接近,所以会形成本底信号。文献[80]中介绍了两种方法,外推法和反符合探测器标记法来确定快中子本底的事例率。大亚湾发表的文章[63]中,采用了用外推法得到的快中子本底事例率和误差(个/天),大亚湾近点为 0.78 ± 0.27 ,岭澳近点为 0.56 ± 0.30 ,远点为 0.04 ± 0.01 。快中子本底能谱也使用了两种方法,一种是挑选 RPC 或外水池标记的快中子,

一种是 MC 模拟。两种方法均得到了能谱均匀分布的结果，如图 75 所示，左图为第一种方法的结果，右图为第二种方法的结果。但是两种方法的统计量都有限，所以设置快中子谱形在每个能量 bin 上的误差为 50%。

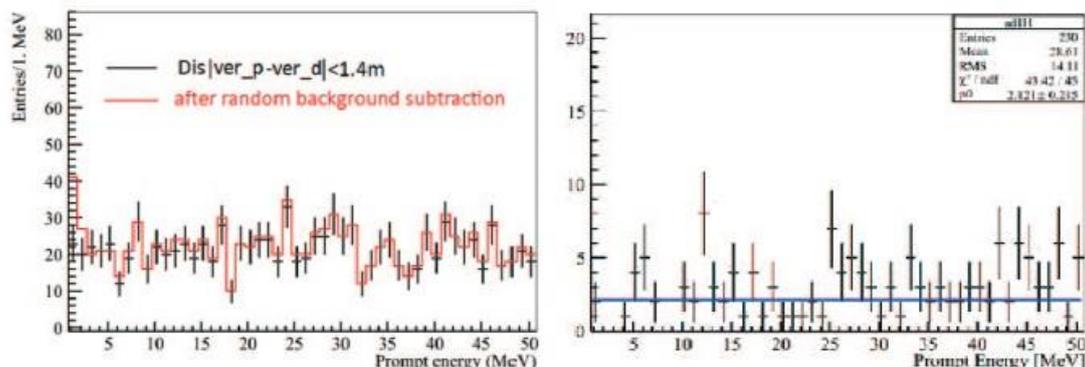


图 75 快中子本底能谱

(4) ${}^9\text{Li}/{}^8\text{Hi}$ 本底

${}^9\text{Li}/{}^8\text{Hi}$ 本底也是与宇宙线 muon 相关的一种本底。宇宙线 muon 撞击碳原子核后，会产生各种比碳原子序数低的元素。其中只有 ${}^9\text{Li}/{}^8\text{Hi}$ 会发生 β -n 级联衰变， β 形成快信号，而中子俘获后形成产生慢信号，快慢信号的符合形成本底信号。 ${}^9\text{Li}/{}^8\text{Hi}$ 本底的事例率和误差（个/天）也使用了文献[68]中的结果，大亚湾近点为 2.9 ± 1.6 ，岭澳近点为 1.5 ± 0.9 ，远点为 0.26 ± 0.14 。 ${}^9\text{Li}/{}^8\text{Hi}$ 本底能谱如图 76 所示，其中 calculation 为理论计算结果。Muon reduction 指对选用的 μ_{shower} 加一个限制条件，要求 μ_{shower} 产生后的 10 到 200 μs 内有超过 1.8MeV 的信号，也就是产生了散裂中子。使用理论计算谱作为 ${}^9\text{Li}/{}^8\text{Hi}$ 本底的能谱，用数据谱形的统计误差作为理论谱形的系统误差。

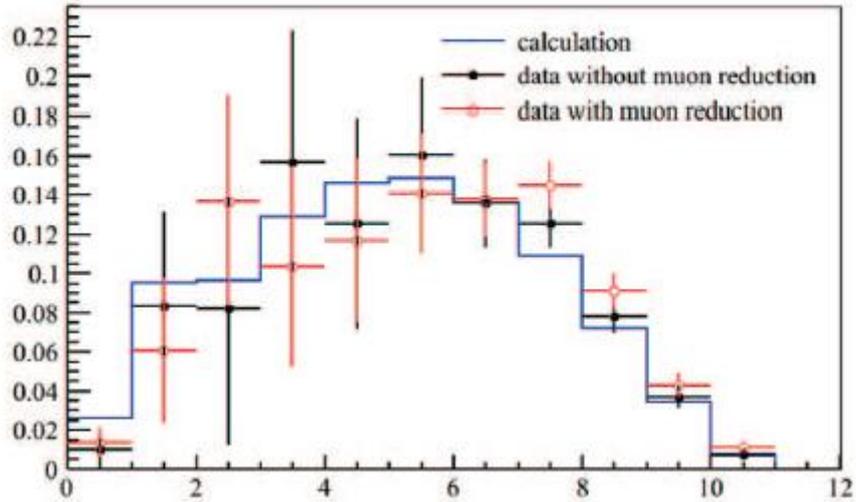


图 76 $^9\text{Li}/^8\text{Hi}$ 本底能谱

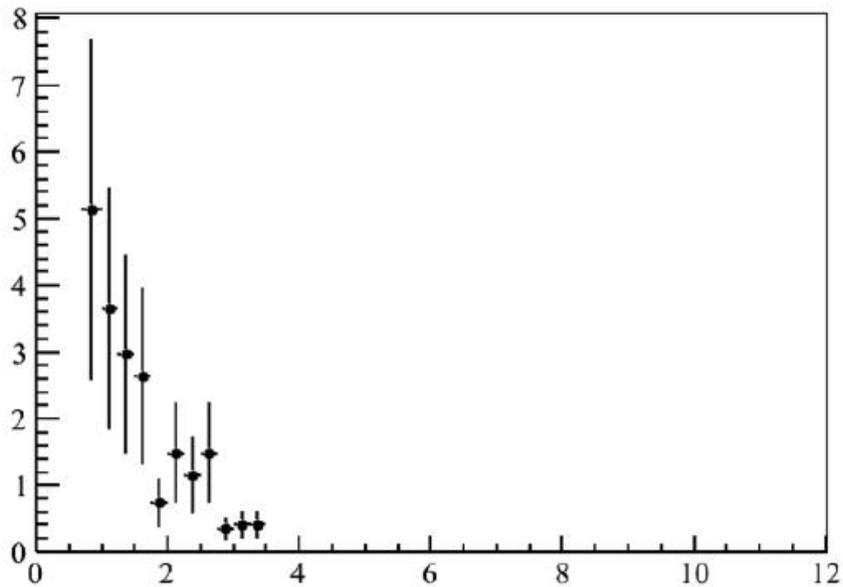


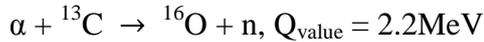
图 77 Am-C 源本底能谱

(5) Am-C 源本底

实验中，Am-C 源放置于探测器顶部，用于刻度探测器对中子的响应，包括相对和绝对效率以及俘获时间等。Am-C 源会释放出的中子会被不锈钢内的原子俘获，释放出的 γ 能量为 6-9MeV。这些 γ 进入探测器时，就会形成慢信号。中子被俘获之前，如果与 Fe 原子发生非弹性散射，就可能把 Fe 原子打到激发态，那么 Fe 原子退激发时会释放出 γ ，当 γ 进入探测器时，就会形成快信号。这样，快慢信号就产生了 Am-C 源本底。Am-C 源本底事例率误差选用[70]中的结果，对于所有探测器一致，为 0.2 ± 0.2 。Am-C 源本底的能谱由 MC 模拟得到，结果如图 77 所示。每个能量 bin 的系统误差保守设置为 50%。

(6) Alpha-n 本底

很多天然放射性事例都会释放出 α 粒子, 如 ^{238}U , ^{232}Th , ^{227}Ac 的衰变过程。而 α 粒子与轻原子核反应能产生中子。大亚湾实验中使用的液闪主要成分是线性烷基苯($\text{C}_{17.3}\text{H}_{23.6}$), 其中含有天然丰度的 ^{13}C 为 1.1%。这里我们以 α 粒子与 ^{13}C 的反应来分析 Alpha-n 本底的形成过程。 α 粒子与 ^{13}C 的反应如下式所示:



反应中产生的 ^{16}O 可能处于基态, 也可能处于激发态。如果 ^{16}O 处于基态, 能量主要由中子带走, 它的动能可能有几个 MeV, 这与快中子的能量相当, 所以这时本底信号的产生过程与快中子本底的过程一致。如果 ^{16}O 处于激发态, 那么中子的动能一般都不大于 1MeV, 其被俘获后形成慢信号; 而处于激发态的 ^{16}O 退激发就形成了快信号, 这时快慢信号符合也会产生本底信号。Alpha-n 本底事例率和误差(个/天)文献[71][72]中的结果, AD1 为 0.08 ± 0.04 , AD2 为 0.07 ± 0.04 , AD3 为 0.05 ± 0.03 , AD4、AD5 和 AD6 均为 0.04 ± 0.02 。Alpha-n 本底能谱由 MC 模拟得到, 如图 78 所示。每个能量 bin 的系统误差保守设置为 50%。

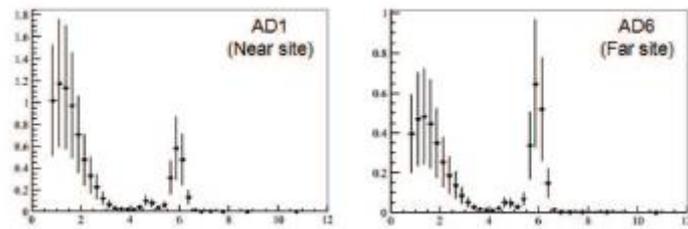


图 78 Alpha-n 本底能谱

3.4.2.2 反应堆相关系统误差

反应堆相关误差参考了文献[73][74]中的分析结果, 主要有以下几种误差。

(1) 反应堆非关联事例率误差

反应堆非关联事例率误差主要来自三个方面, 反应堆热功率 (0.5%)、裂变分支比 (0.6%) 和核废料 (0.3%)。其中反应堆功率误差不影响谱形, 只贡献事例率的误差, 而其他两项对谱形有影响。因此, 在之后的考虑中, 设置反应堆非关联的事例率误差为 0.5%。

(2) Bin 相关联谱形误差

每次裂变的 IBD 反应误差来自两个方面, IBD 反应截面和反中微子通量。IBD 反应截面误差与中子寿命误差相关。反中微子通量误差来自两个方面, 从 β 能谱

转化为反中微子能谱的过程和归一化，而这两个误差跟中微子能量有关。

将上面的误差综合考虑为 Bin 相关联的能谱波形误差。综合考虑反应堆中各种同位素，得出 Bin 相关联能谱波形误差为 1.5%~100%，在每个能量 bin 取值不一样但是互相关联。

(3) Bin 非关联谱形误差

对于一个裂变同位素的能谱，从 β 能谱转化为反中微子能谱后，每一个能量 bin 由于 β 能谱测量的统计误差，以及由于转化过程产生的偏移形成了 Bin 非关联能谱波形误差，设置误差值为 0.5~100%，在每个能量 bin 取值不一样，并且各自独立。

(4) 核废料误差

核废料的反中微子能谱与反应堆的不同，我们把它看作是反应堆中微子能谱的一个本底。不同的反应堆的核废料误差是非关联的。这里取核废料与反应堆能谱总事例率比值约为 0.3%，同时设置这个误差为 100%。

(5) Non-equilibrium 误差

在反应堆反中微子通量计算中会考虑 Non-equilibrium 效应。这个效应会贡献约 0.6% 额外的中微子并且与 IBD 能谱不一样。这里假定 100% 的 Non-equilibrium 贡献误差。

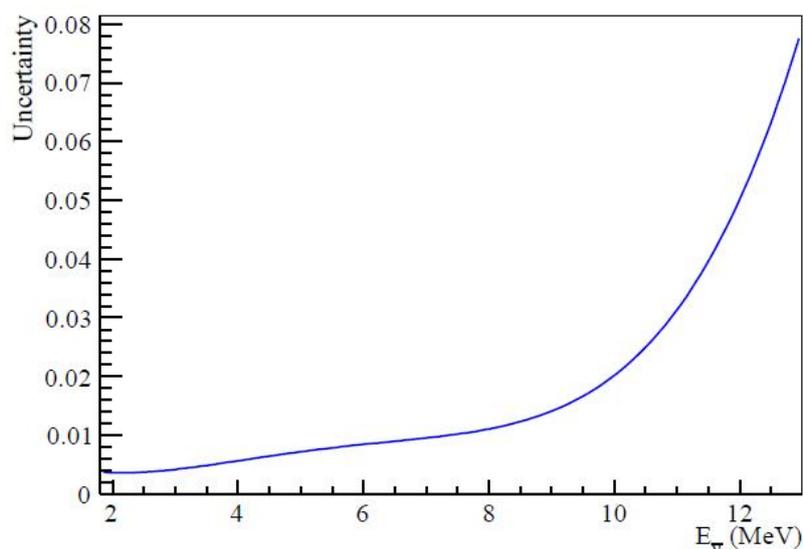


图 79 裂变分支误差与反中微子能量对应关系

(6) 裂变分支误差

在只考虑事例率的分析时，我们假定四种同位素 ^{235}U ， ^{238}U ， ^{239}Pu ， ^{241}Pu 的

裂变分支误差为 5%，这将会给每个探测器的 IBD 事例率带来 0.6% 的误差。在考虑事例率和能谱波形的分析时，每个能量 bin 的误差都是不同的。图 79 显示了裂变分支误差与反中微子能量的对应关系。

3.4.2.3 探测器相关系统误差输入

(1) 探测器效率与事例率误差

在大亚湾发表的文章[67]中使用的探测器效率及其误差如表 13 所示。

表 13 探测器效率及其误差

Rate uncertainties	Detector		
	Efficiency	Correlated	Uncorrelated
Target Protons		0.47%	0.03%
Flasher cut	99.98%	0.01%	0.01%
Delayed energy cut	90.9%	0.6%	0.12%
Prompt energy cut	99.88%	0.10%	0.01%
Multiplicity cut		0.02%	<0.01%
Capture time cut	98.6%	0.12%	0.01%
Gd capture ratio	83.8%	0.8%	<0.1%
Spill-in	105.0%	1.5%	0.02%
Livetime	100.0%	0.002%	<0.01%
Combined	78.8%	1.9%	0.2%

(2) 能量标度误差

能量标度误差会给事例率和能谱波形带来误差。在 IBD 事例挑选中，0.5% 的能量标度误差会带来 0.12% 的事例率误差[67]。能标不确定性会带来谱形平移从而导致谱形误差。图 80 显示了在 1% 能标平移的情况下中微子能谱变化的百分比。

(3) 非线性误差

非线性误差指对 IBD 能谱进行非线性修正时带来的误差。图 81 显示了非线性曲线的最佳拟合值和误差带。

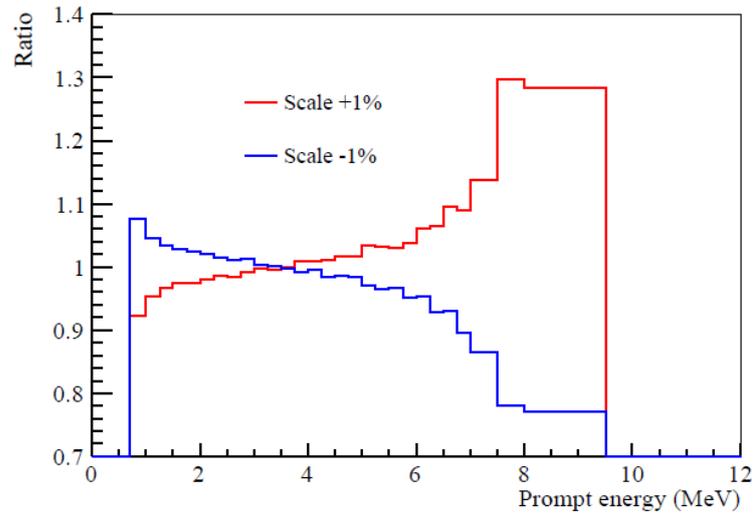


图 80 1%的能标平移引起的中微子能谱变化百分比

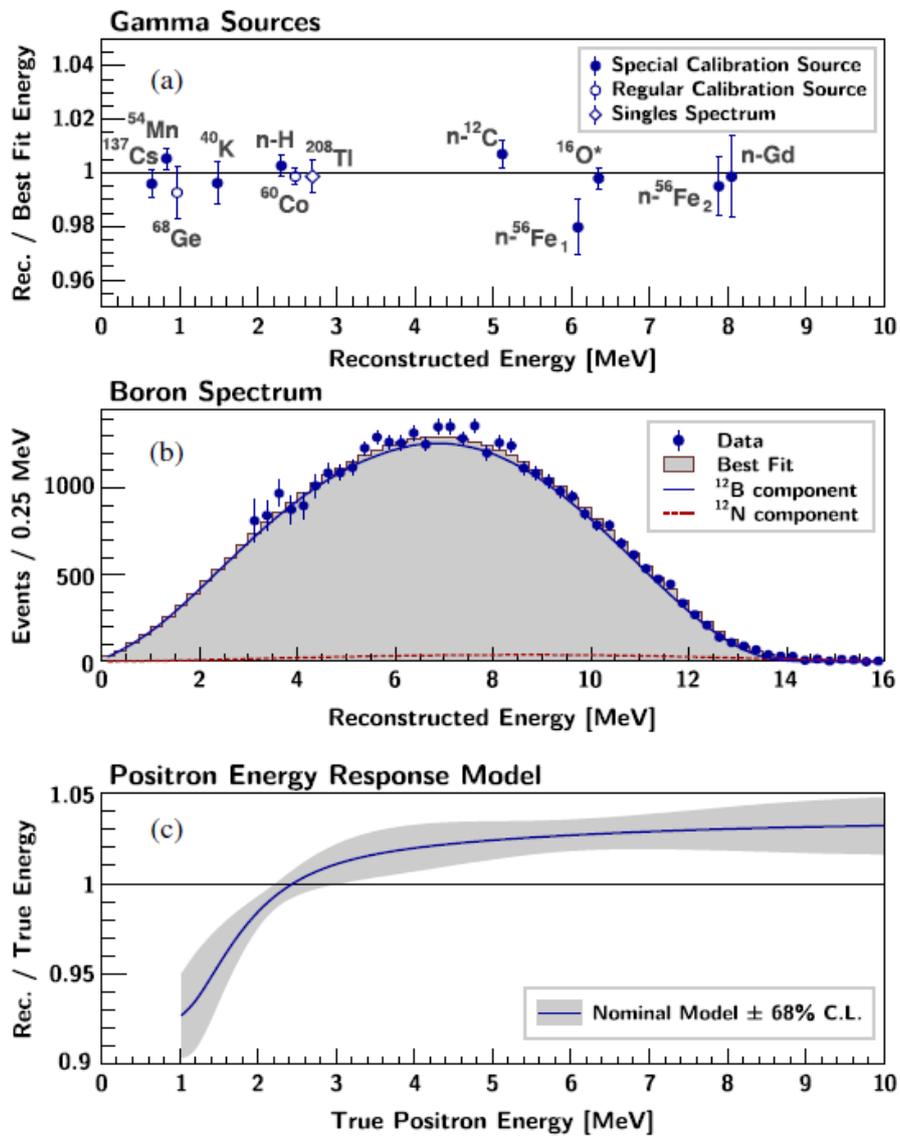


图 81 非线性曲线的最佳拟合值和误差带

3.4.3 分析方法 (χ^2)

3.4.3.1 χ^2 的定义

我们使用 χ^2 拟合的方法来研究中微子 3+1 振荡参数 θ_{14} 与 Δm_{41}^2 的关系。输入数据包括：IBD 的测量能谱、本底能谱和误差、IBD 预测能谱、6 个 AD 的探测器误差和反应堆的误差。拟合过程中使用事例率加谱形的信息。

对于 χ^2 函数，我们采用如下形式[75][76]:

$$\begin{aligned} \chi^2 = & \min_{\gamma} \sum_{d,i} \frac{[M_d^i - F_d^i - \sum_b \eta_{d,b} B_{d,b}^i]^2}{M_d^i + \sum_b B_{d,b}^i + \sigma_{i,d}^2 (M_d^i)^2} \\ & + \sum_r \left[\frac{\epsilon_r^2}{\sigma_r^2} + \left(\frac{\epsilon_r^n}{\sigma_r^n} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_r^s}{\sigma_r^s} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_r^f}{\sigma_r^f} \right)^2 \right] + \frac{\epsilon_i^2}{\sigma_i^2} \\ & + \frac{\Delta p_1^2}{\sigma_1^2} + \frac{\Delta p_2^2}{\sigma_2^2} + \left(\frac{\epsilon^E}{\sigma^E} \right)^2 + \sum_d \left[\frac{\epsilon_d^2}{\sigma_d^2} + \left(\frac{\epsilon_d^E}{\sigma_d^E} \right)^2 + \sum_b \left(\frac{\eta_{d,b}}{\sigma_{d,b}} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} F_d^i = & T_d^i (1 + \epsilon_D + \epsilon_d + \epsilon_i + \sum_r \omega_r^d (\epsilon_r + \epsilon_r^n S_n^i + \epsilon_r^s S_s^i + \epsilon_r^f S_f^i)) + a^i \epsilon_R + \\ & f(p_0, p_1, p_2, p_3) + (b + b^i) \epsilon_d^E + c^i \epsilon^E \end{aligned} \quad (3.12)$$

上式中，d 代表对 6 个 AD 的指标，i 代表对能量 bin 的指标，r 代表对反应堆的指标。 M_d^i 表示的是 IBD 的测量能谱， B_d^i 表示本底能谱， F_d^i 表示预期 IBD 能谱。公式中的 pull 参数 $\{\epsilon_D, \epsilon_d, \epsilon_i, \epsilon_r, \epsilon_r^n, \epsilon_r^s, \epsilon_r^f, \epsilon_R, p_0, p_1, p_2, p_3, \epsilon_d^E, \epsilon^E, \eta_{d,b}\}$ ，这组参数引入不同种类的系统误差。假定系统误差属于高斯分布，标准方差对应的参数为 $\{\sigma_r, \sigma_r^n, \sigma_r^s, \sigma_r^f, \sigma_i, \sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma^E, \sigma_d, \sigma_d^E, \sigma_{d,b}\}$ 。

3.4.3.2 χ^2 中的误差输入

3.3.2 小节中对本底及其误差，反应堆相关系统误差和探测器相关系统误差，进行了详细介绍，这些误差作为 χ^2 的输入参数。我们将 χ^2 公式中各参数对应的误差总结在表 15, 16, 17 中。

表 14 IBD 与本底事例相关误差

事例率误差	值	Nuisance Pars	变量个数
偶然符合本底		$\eta_{d,b}$	6
快中子本底		$\eta_{d,b}$	3
${}^9\text{Li}/{}^8\text{Hi}$ 本底		$\eta_{d,b}$	3
Am-C 源本底		$\eta_{d,b}$	1
Alpha-n 本底		$\eta_{d,b}$	6
谱形误差	值	Nuisance Pars	变量个数
Bin to bin	$\sigma_{i,d}$		0

表 15 反应堆相关误差

误差	数值	Nuisance Pars	变量个数
非相关联事例率	σ_r : 0.5%	ϵ_r	6
Bin 相关联谱形	a^i :1.5%~100%	ϵ_R	1
Bin 非相关联谱形	σ_i :0.5~100%	ϵ_i	bin 的个数
核废料	σ_r^s :100%	ϵ_r^s	6
Non-equilibrium	σ_r^n : 100%	ϵ_r^n	6
裂变分支	σ_r^f :5%	ϵ_r^f	6

表 16 探测器相关误差

误差	数值	Nuisance Pars	变量个数
绝对探测效率	1.9%(无限制)	ϵ_D	1
相对探测效率	σ_d : 0.11%	ϵ_d	6
绝对能量标度	σ^E :1%	ϵ^E	1
相对能量标度	σ_d^E : 0.5%	ϵ_d^E	6
非线性修正	$\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	p_0, p_1, p_2, p_3	4

3.4.3.3 χ^2 的拟合过程

待拟合参数 θ_{14} 与 Δm^2_{41} 在计算预期中微子能谱 T_i 的时候输入。预期中微子能谱的计算[77]包括如下几个步骤：

(1) 反应堆中微子流强的计算。主要用到了核电站各反应堆的热功率，四种核素 ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu 的中微子能谱和他们的裂变率，以及每次裂变释放的能量，公式如下：

$$S(E_\nu) = \frac{W_{th}}{\sum_i (f_i/F)e_i} \sum_i^{istopes} (f_i/F)S_i(E_\nu) \quad (3.13)$$

中微子流强的计算结果保存在了大亚湾的数据库中，程序可以直接调用用于计算。

(2) 中微子流强与探测器反应的 IBD 事例能谱计算。用到了 IBD 反应截面，反应堆到探测器的基线长度，探测器靶质子数的信息。

(3) IBD 事例的模拟和重建。IBD 事例通过大亚湾模拟软件进行模拟，进行事例能量重建跳出 IBD 事例。挑选效率和误差见表格 14。挑选出来的快信号事例构成未振荡的中微子能谱。

(4) 根据中微子的能量，和到各个反应堆的基线长度以及各个反应堆的贡献，利用公式 3.10 加入加入中微子的振荡几率 $P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}$ ，得到 6 个 AD 的预期能谱 T_i ，用于 χ^2 拟合。

表 17 置信范围与 $\Delta \chi^2$ 对应关系

置信度 (%)	1 个参数	2 个参数	3 个参数
68.27	1.00	2.30	3.53
90	2.71	4.61	6.25
95	3.84	5.99	7.82
95.45	4.00	6.18	8.03
99	6.63	9.21	11.34
99.73	9.00	11.83	14.16

χ^2 拟合过程中, 在参数空间内扫描了每对参数 θ_{14} 与 Δm_{41}^2 对应的 χ^2 值, 得到了最佳拟合值的 χ^2_{\min} 并计算参数空间内各点的 $\Delta \chi^2 = \chi^2 - \chi^2_{\min}$, 根据 $\Delta \chi^2$ 值做出置信范围或者排除线。 $\Delta \chi^2$ 与置信范围的对应关系如表 18 所示, 对于我们有 2 个参数的情况, 99%的置信度对应于 $\Delta \chi^2 = 9.21$ 。

3.4.4 实验结果分析

3.4.4.1 不同基线的分析

我们在前面分析中, 讨论了大亚湾探测器的基线对实验结果的影响, 得出由于大亚湾两个近点探测器的独特基线, 可以给出很好的排除结果。图 82 给出了 EH1+EH2 与 EH1+EH2+EH3 的结果对比。

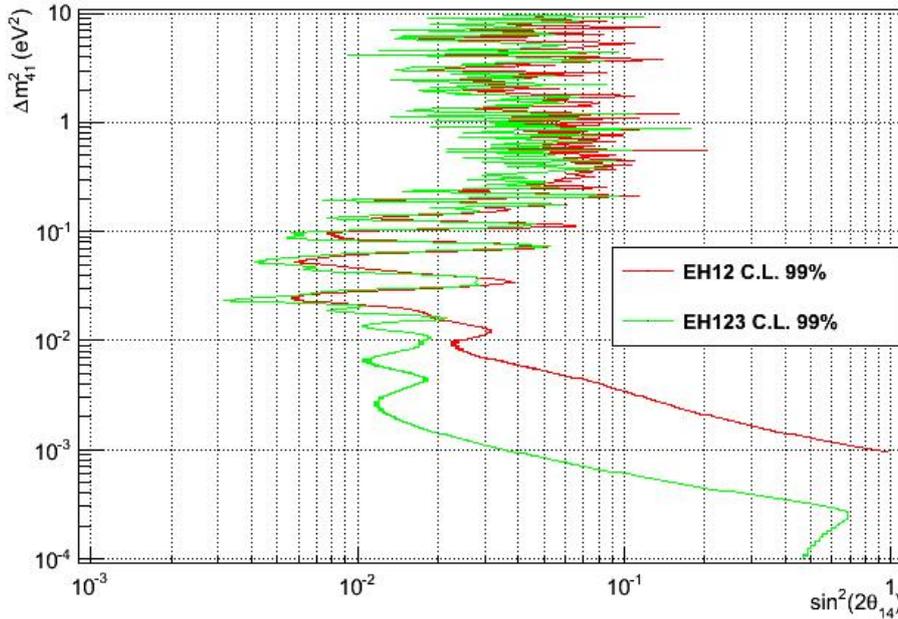


图 82 EH1+EH2 与 EH1+EH2+EH3 的结果对比

从图中我们可以看出, EH1+EH2 在 $0.01\text{eV}^2 < \Delta m_{41}^2 < 0.1\text{eV}^2$ 范围内, 有最好的排除能力, 这与我们前面的分析是一致的。而 EH3 主要在 $\Delta m_{41}^2 < 0.01\text{eV}^2$ 时, 有更好的排除能力。

3.4.4.2 能量分辨分析

本文使用的数据中 AD1 的快信号能谱如图 83 所示。大亚湾探测器能谱分辨率 σ_E 与 \sqrt{E} 的比值为 8% [63]。分析 $\sin^2 2\theta_{13}$ 时, 在 0.7 到 12 MeV 的事例率区间, 共分了 29 个 bin, 其中在 1 MeV 到 7 MeV 的主要事例率区间分了 24 个 bin, 每

个 bin 的能量分辨为 0.25MeV。图 84 给出了 99% ($\Delta\chi^2=9.21$) 置信度下对中微子 θ_{14} 振荡的排除曲线。

考虑到能量分辨在 3MeV (即快信号能谱中心值) 时为 0.139MeV, 我们将 29 个 bin, 每个 bin 一分为二, 这样在 1MeV 到 7MeV 之间每个 bin 对应 0.125MeV 的能量, 与能量分辨率相当。这种情况下, 由于包含了更多能谱信息, 得到排除曲线比 29 个 bin 的情况略好, 如图 81 所示。图中曲线为 $\sin^2 2\theta_{14}$ 与 Δm^2_{41} 排除曲线, 右侧为排除区域。曲线对应 $\Delta\chi^2=9.21$, 即 99% 置信度。可以看出 58 个 bin 时的排除情况要好一些。

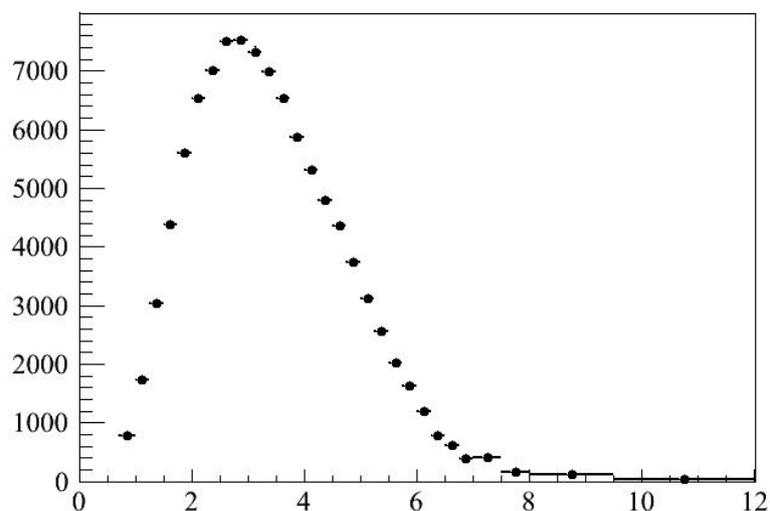


图 83 AD1 快信号能谱

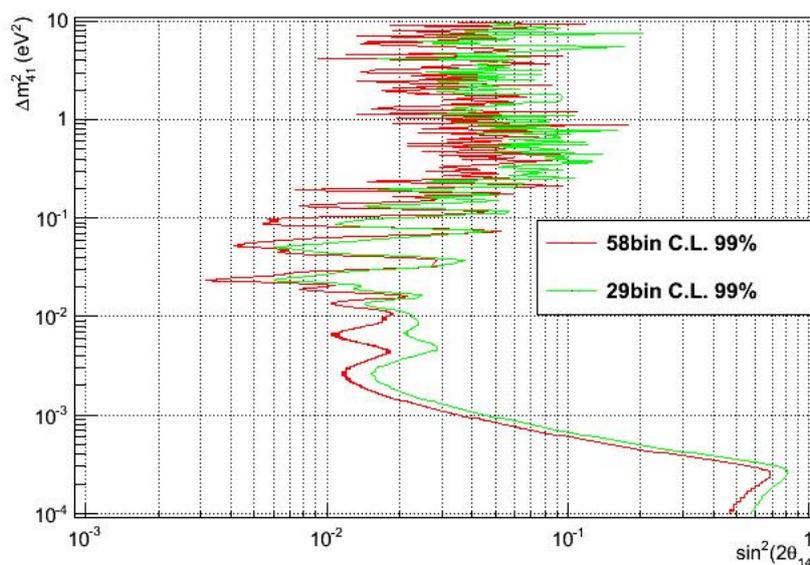


图 84 29 个 bin 与 58 个 bin 对应 $\sin^2 2\theta_{14}$ 与 Δm^2_{41} 排除曲线

3.4.4.3 绝对探测效率分析

因为大亚湾实验采用远近点对比测量。用近点的实验数据去预测远点的预期值，从而完全消除了探测器绝对探测效率对实验结果的影响，所以在上述 χ^2 公式中未加入绝对探测效率的误差。绝对事例率依赖于中微子流强的计算，这里我们在分析惰性中微子时，考虑绝对探测效率误差对结果的影响，在 χ^2 公式中加入一项来代表此误差。这里我们假设绝对探测效率误差为 10%。图 85 是考虑绝对探测效率误差后对应的排除曲线（29 个 bin）。可以看出其排除能力较不考虑误差时减弱了。

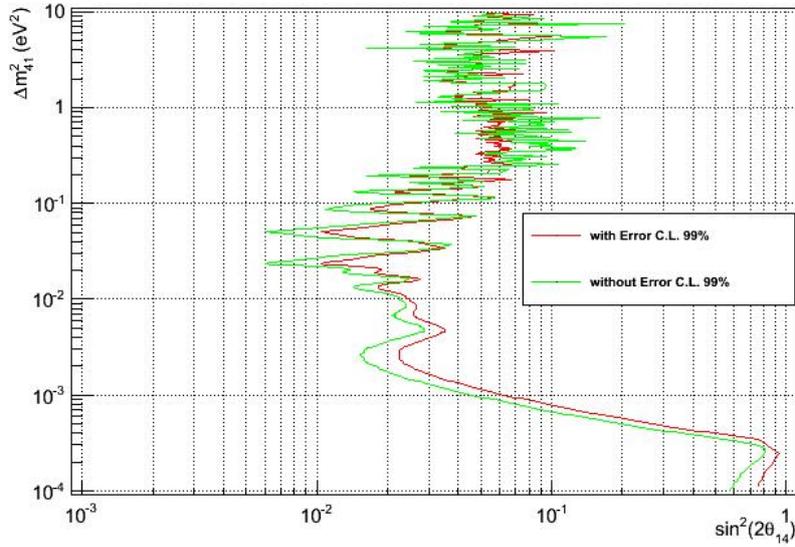


图 85 考虑绝对探测效率误差后 $\sin^2 2\theta_{14}$ 与 Δm^2_{41} 排除曲线

3.4.4.4 将 theta13 作为自由变量的分析

我们对 theta13 的不同值进行扫描，得到如图 86 的结果。从图中可以看到， Δm^2_{41} 小于 0.01eV^2 时，排除曲线有较大的向右偏移。从 4 代中微子振荡机率公式 3.10 可以看出，当 Δm^2_{41} 很小时， $\sin^2\left(\frac{\Delta m^2_{41}L}{4E_{\nu_e}}\right) \approx 0$ ， $\sin^2\left(\frac{\Delta m^2_{42}L}{4E_{\nu_e}}\right) \approx$

$$\sin^2\left(\frac{\Delta m^2_{21}L}{4E_{\nu_e}}\right), \sin^2\left(\frac{\Delta m^2_{43}L}{4E_{\nu_e}}\right) \approx \sin^2\left(\frac{\Delta m^2_{31}L}{4E_{\nu_e}}\right),$$

因此 4 代中微子的振荡周期接近于 3 代中微子的振荡周期。这里假定 Δm^2_{41} 为 0.002，4 代中微子与 3 代中微子振荡周期对比图如图 87 所示。从图 87 可以看出，此时 4 代中微子的振荡

周期与 3 代中微子相近， θ_{13} 与 θ_{14} 的振荡幅度发生了简并，因此 θ_{14} 的灵敏性下降，所以图 86 中的排除曲线的排除能力减弱而向右移。

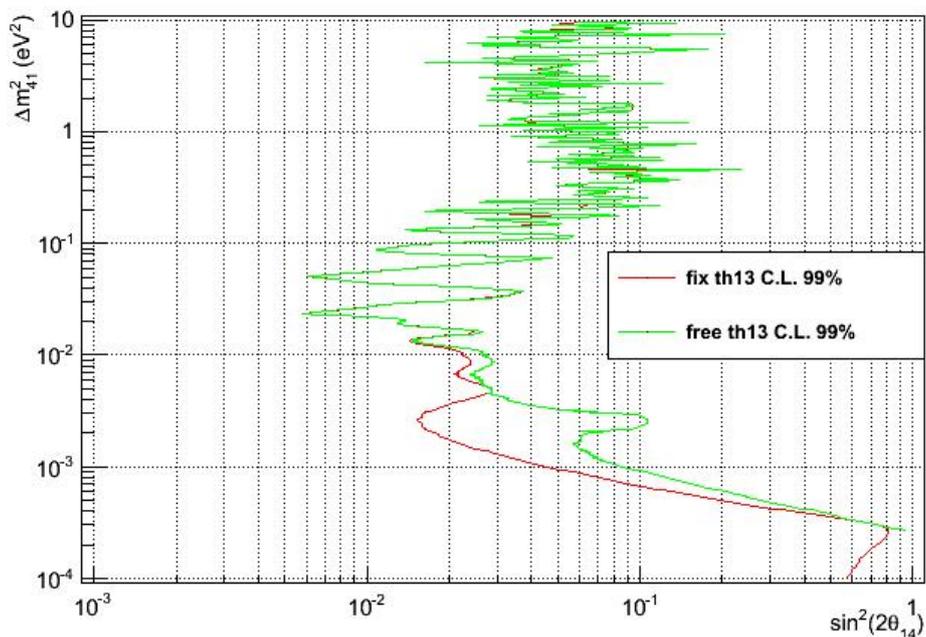


图 86 θ_{13} 作为自由变量的影响

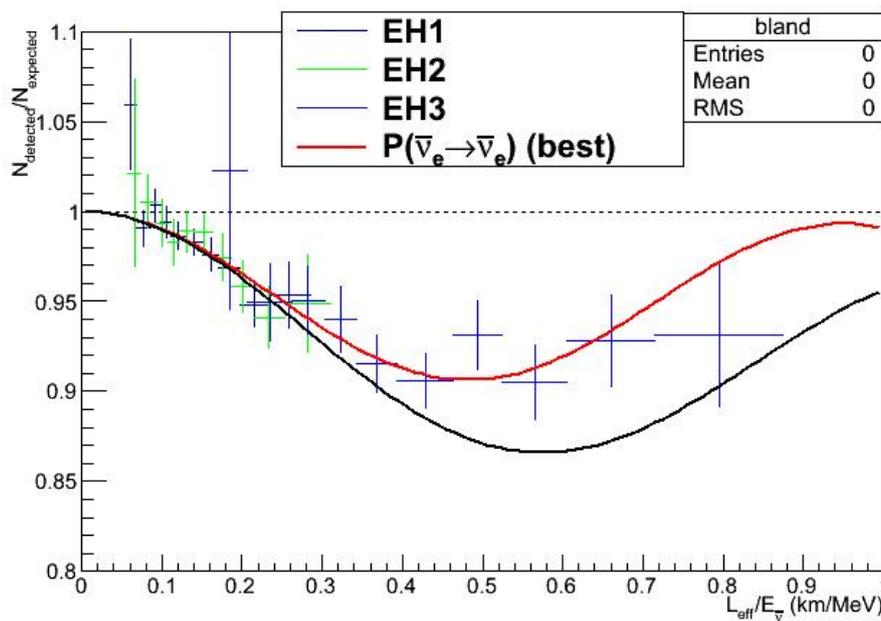


图 87 Δm^2_{41} 为 0.002 时 4 代中微子与 3 代中微子振荡周期对比

3.4.4.5 与其他实验结果对比

前面我们介绍了文章[33]对多个短基线反应堆实验的分析，这些实验中基线长度都在 100 米以内。文中综合各个反应堆实验给出了图 70 的结果，图中的红线对应 99% 的排除曲线，下面将大亚湾的实验结果与这条红线进行对比，如图

88 所示。从图 88 可以看出，在 Δm_{41}^2 小于 0.1eV^2 时，大亚湾实验的数据有更好的排除能力。而这正是因为大亚湾多个探测器，多个基线长度所获得的探测能力。从而说明了，在 Δm_{41}^2 小于 0.1eV^2 时，更长的基线长度对 $\sin^2 2\theta_{14}$ 有更好的约束能力。

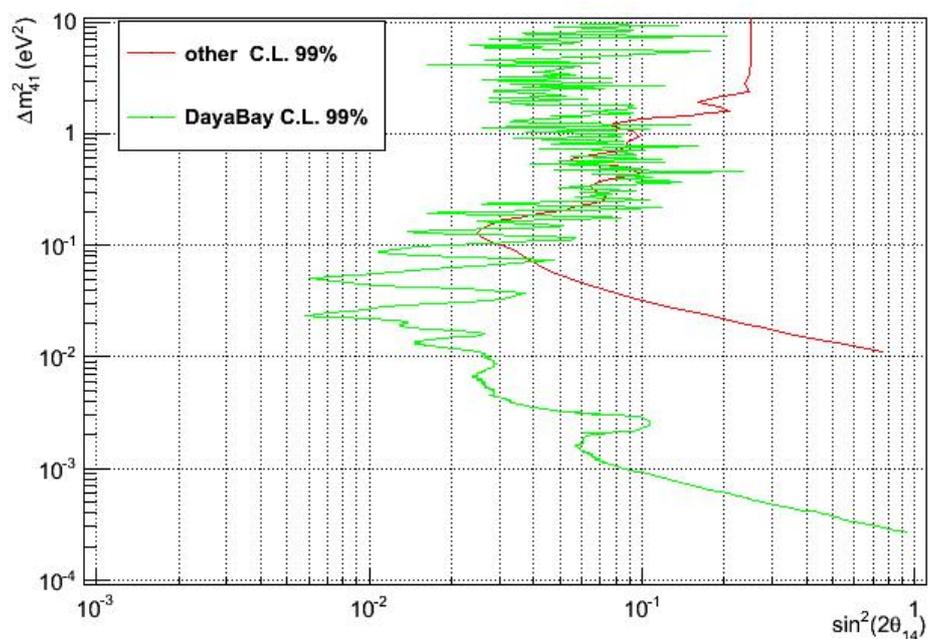


图 88 大亚湾实验与其他反应堆实验的比较

3.5 小结

本章首先介绍了 LSND 与 MiniBooNE 实验在惰性中微子研究方面的结果，其证明了惰性中微子存在的可能性。然后介绍了文献[33]对短基线反应堆实验的再研究，同样给出了惰性中微子存在的证据。

本章利用大亚湾实验的数据对惰性中微子进行了研究。从不同基线长度的分析，可以看到，大亚湾近点的探测器对排除曲线的贡献最大。对于能量分 bin 的分析，能量分辨率越高，结果的排除能力较好。而由于大亚湾实验远近点探测器的特性，使得绝对探测效率对结果的影响很小。最后，由于大亚湾实验多个探测器，多个基线长度的特性，使得其在 Δm_{41}^2 为 $0.001\text{eV}^2 \sim 0.1\text{eV}^2$ 范围内，具有比其他实验更好的排除能力。

第四章 总结与展望

本文采用 LabVIEW 作为探测器控制系统的 SCADA 开发平台，为大亚湾实验节省了经费，缩短了开发时间。通过多种方式实现了探测器控制系统的分布式数据管理，满足了大亚湾实验的各种需求。在探测器的装、调试、运行等过程中提供了有力的支持，为大亚湾中微子实验在国际竞争抢先发布 θ_{13} 的精确结果，赢得了宝贵的时间。

本文基于 LabVIEW，实现了分布式数据管理的探测器控制系统，为以后的探测器控制系统开发提供了一种新的解决方案。

值班员在值班过程中为了监测探测器整体情况，需要观察多个界面造成不便。在以后的改进中，可以开发探测器整体状态界面，方便值班员监测探测器的运行状态。

惰性中微子是近年来一个研究热点，本文利用大亚湾的实验数据对惰性中微子进行了研究，并给出了当前国际上相应区域内最好的结果。本文中使用了 6 个 AD，217 天的数据，现在 8 个 AD 已经开始取数，随着取数时间的延长，相信大亚湾的数据能进一步提高精度。

附录

附录一 大亚湾数据表命名规则

大亚湾数据表命名规则为：SITE_MainSystem_SubSystem

附录 1.1 数据表命名规则——SITE

SITE：指大亚湾的各个实验厅的名字或简称：

大亚湾近厅为 DBNS；

岭澳近厅为 LANS；

大亚湾远厅为 FARS；

地面安装大厅为 SAB；

液闪灌装大厅为 LSH 等。

附录 1.2 数据表命名规则——MainSystem

MainSystem：指以探测器为主的主系统：

AD 探测器，大亚湾近点的为 AD1 和 AD2；

RPC 气体探测器为 RPC；

内水池为 IW；

外水池为 OW；

环境探测系统为 ENV 等。

附录 1.3 数据表命名规则——SubSystem

SubSystem 表示探测器中包含和各种子系统：

HV：高压监控系统；

VME：VME 机箱监控系统；

TH：温度监测系统；

GAS：气体监控系统；

LidSensor: 端盖监测系统;
Camera: Camera 监测系统;
RadonMonitor: 氡气监测系统;
MuonCal: Muon 刻度系统等。

附录二 DIM Service 中数据类型描述

DIM Service 中数据类型描述的格式为: T:N;T:N;T

其中 T 表示数据类型, N 表示此数据类型数据的数目, 最后一个数据类型的描述可以省略它的数目。

各种数据类型的表示符号如下:

C: Char 字符类型

L: long int 长整型

I: int 整型

S: short int 短整型

F: float 浮点数类型

D: double 双精度浮点类型

X: xtra long 类型

附录三 各子系统 command service 数据格式

各子系统 command service 数据格式统一规定为字符(char)类型的数组, 根据不同子系统的需求定义各字节意义。

附录 3.1 高压监控系统

高压监控系统的命令格式定义如下表所示:

表格 13 高压监控系统命令格式定义

Operational type	Command status	Crate NO	Slot NO	Channel NO
------------------	----------------	----------	---------	------------

Operational type: 定义高压动作的类型, 0 表示对高压机箱(crate)的操作; 1 表示对高压机箱上某个插件(slot)的操作; 2 表示对高压机箱上某个通道(channel)的操作。

Command status: 定义高压动作所要达到的状态;

0 表示动作到工作高压状态;

1 表示动作到高压关闭状态;

2 表示动作到预备高压状态;

3 表示 Clear Trip 动作;

4 表示 Reset 动作;

5 表示 Kill 动作;

10 表示更新配置文件动作;

20 表示 Disable 操作高压;

21 表示 Enable 操作高压。

Crate NO: 表示高压机箱的编号。

Slot NO: 表示高压插件在高压机箱中的编号。

Channel NO: 表示高压通道在高压插件中的编号。

附录 3.2 VME 机箱监控系统

VME 机箱监控系统的命令格式定义如下表所示:

表 18 VME 机箱监控系统命令格式定义

Command status	Crate NO
----------------	----------

Command status: 表示操作 VME 机箱所要达到的状态;

0 表示关闭 VME 机箱;

1 表示打开 VME 机箱;

10 表示更新配置文件。

20 表示 Disable 操作;

21 表示 Enable 操作。

Crate NO: 表示 VME 机箱的编号。

附录 3.3 气体监控系统

气体监控系统电子学板的命令格式定义如下图所示:

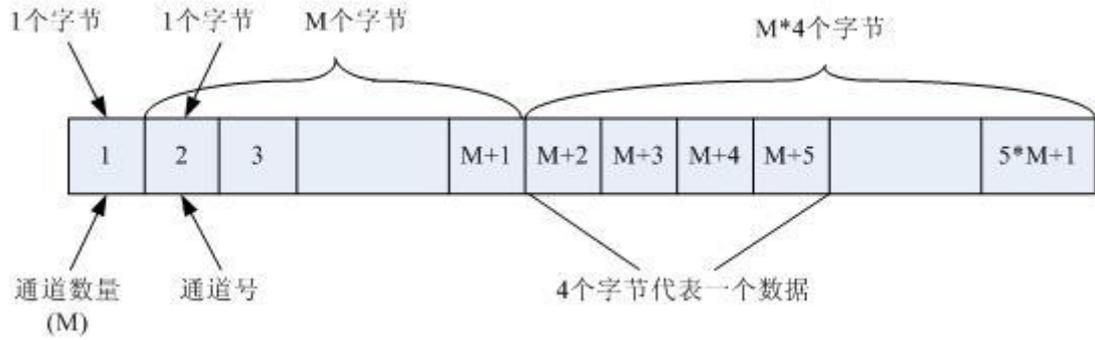


图 89 气体监控系统命令格式定义

第一个字节表示此命令所操作的通道数量 M；

紧接着 M 个字节表示此命令所操作的通道的通道号；

然后 $M \times 4$ 个字节表示对应通道所要写入的数据，每 4 个字节表示一个 float 类型的数值，此数值就是要写入气体电子学板对应通道的数值。

本地软件与全局控制软件的命令格式：

表 19 气体监控系统软件命令格式定义

Command status

Command status:

10 表示更新配置文件。

20 表示 Disable 操作；

21 表示 Enable 操作。

附录四 更新配置文件对应 DIM Command Service 的命令定义

此命令格式采用 string 格式。

附录 4.1 本地监控系统

由于每一个本地监控系统都要运行一个 DIM Command Service，因此其定义相对简单，只需要在全局控制系统改变配置文件后向相应本地监控系统发送 1 表示更新即可。

附录 4.2 全局监控系统

而为了使全局控制系统的 DIM Command Service 得以简化，针对所有本地控制系统只运行一个 DIM Command Service 来接收所有本地监控系统配置文件更新

的命令，其定义格式如下：

SITE_MainSystem_SubSystem

其中 SITE, MainSystem, SubSystem 与其在数据表中的定义一致。

附录五 VME 机箱监控物理量的 OID 码及其数据类型

表格 16 VME 机箱监控的物理量

1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1.5.1	Positive 5v' s Voltage	Float
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1.7.1	Positive 5v' s Current	Float
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1.5.5	Negative 5.2v' s Voltage	Float
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1.7.5	Negative 5.2v' s Current	Float
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1.5.2	Positive 12v' s Voltage	Float
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1.7.2	Positive 12v' s Current	Float
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1.5.6	Negative 12v' s Voltage	Float
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1.7.6	Negative 12v' s Current	Float
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1.5.4	Positive 3.3v' s Voltage	Float
1.3.6.1.4.1.19947.1.3.2.1.7.4	Positive 3.3v' s Current	Float
1.3.6.1.4.1.19947.1.4.2.1.2.1	External temperature sensor 1	Integer
1.3.6.1.4.1.19947.1.4.2.1.2.2	External temperature sensor 2	Integer
1.3.6.1.4.1.19947.1.4.2.1.2.3	External temperature sensor 3	Integer
1.3.6.1.4.1.19947.1.4.2.1.2.4	External temperature sensor 4	Integer
1.3.6.1.4.1.19947.1.4.2.1.2.5	External temperature sensor 5	Integer
1.3.6.1.4.1.19947.1.4.2.1.2.6	External temperature sensor 6	Integer
1.3.6.1.4.1.19947.1.4.2.1.2.7	External temperature sensor 7	Integer
1.3.6.1.4.1.19947.1.4.2.1.2.8	External temperature sensor 8	Integer
1.3.6.1.4.1.19947.1.7.4.0	Fan tray temperature sensor	Integer
1.3.6.1.4.1.19947.1.7.8.1.2.1	Fan rotation speed	Integer
1.3.6.1.4.1.19947.1.1.1.0	Switch of the crate	Integer

参考文献

- [1] Z.Z.Xing, plenary talk given at ICHEP2008; *Int. J. Mod. Phys. A* 23, (2008)4255
- [2] J.Chadwick, *Verh. d. D. Phys. Ges.* 16, (1914)383.
- [3] W.Pauli, letter to T ubingen conference, December 4, 1930; L.M. BrOWPn, *Phys. Today* 23, Sept. 1978.
- [4] E.Fermi, *Ricerca Scientifica* 2, 12(1933).
- [5] K. C. Wang, *Phys. Rev.*, 61(1942): 97.
- [6] 王淦昌, 各种基子之发现及其性能, 《科学世界》 16, (1947): 233-240.
王淦昌, 微中子问题的现阶段, 《科学世界》 19(4), (1950): 89-94.
- [7] "Detection of the Free Neutrino: A Confirmation", C.L. Cowan, Jr., F.Reines, F.B.Harrison, H.W.Kruse and A.D.McGuire, *Science* 124, 103(1956).
- [8] T.D.Lee and C.N.Yang, *Phys. Lett.* 104,254(1956).
- [9] C.S.Wu, et al., *Phys. Lett.* 105, 1413(1957).
- [10] R.P.Feynman and M.Gell-Mann, *Phys.Rev*, 109,193(1958); E.C.G.Sudarshan and R.E.Marshak, *Phys.Rev.* 109,1860(1958).
- [11] L.Landau, *Nucl. Phys.* 3,127(1957); T.D.Lee and C.N.Yang, *Phys.Rev.* 105.1671(1957).
- [12] G.Danby, J.M.Gaillard, K.Goulianos, L.M. Lederman, N.Mistry, M.Schwartz and J.Steinberger, *Phys.Rev.Lett.*9,36(1962).
- [13] S.L. Glashow, *Nucl.Phys.*22,579(1961); S.Weinbery, *Phys.Rev.Lett.*19,1264(1967).
- [14] P.W.Higgs, *Phys.Lett.*12,132(1964); *Phys.Rev.Lett.*13,508(1964); *Phys.Rev.*145,1156(1966).
- [15] F.J.Hasert et al., *Phys.Lett.B* 46,121(1973); A.C.Benvenuti et al., *Phys.Rev.Lett.*32,800(1974); G.Arnison et al., *Phys.Lett.B* 122,103(1983).
- [16] DONUT Collaboration, K.Kodama et al., *Phys.Lett.B* 504,218(2001),hepex/0012035.
- [17] The Super-Kamiokande Collaboration, Y.Fukuda et al., *Phys.Rev.Lett.*81, 1562(1998); *Phys.Rev.D* 71,112005(2005).
- [18] The SNO Collaboration, P.Adamson et al., *Phys.Rev.D* 74,072003(2006).
- [19] The KamLAND Collaboration, S.Abe et al., *Phys.Rev.Lett.*100, 221803(2008).
- [20] The K2K Collaboration, M.H.Ahn et al., *Phys.Rev.D* 74,072003(2006).
- [21] The MINOS Collaboration, P.Adamson et al., *Phys.Rev.Lett.*101,131802(2008).
- [22] M. Apollonio et al., *Phys. Rev. Lett.* B466, 415(1999); *Eur. Phys. J. C*27, 331(2003).

- [23] http://dayabay.ihep.ac.cn/cn/docs/experiment_cn.html 大亚湾中微子实验简介。
- [24] 邢志忠, 周顺 《中微子: 从粒子物理学到天文学和宇宙学》 浙江大学出版社, 2010年12月。
- [25] Daya Bay Project Technical Design Report 3rd Draft December 7, 2007. Experimental Site.
- [26] Daya Bay Project Technical Design Report 3rd Draft December 7, 2007. Experimental Setup.
- [27] ATLAS Pixel Detector 探测器控制系统
<http://www.atlas.uni-wuppertal.de/atlas/dcs/index.english.html#olink>
- [28] PVSS 的通用性介绍 www.siemens.com
- [29] <http://www-hades.gsi.de/scs/index.html>
- [30] The slow control system of the HADES RPC wall
doi:10.1016/j.nima.2010.08.033
- [31] C. Athanassopoulos et al., Phys. Rev. Lett. 75, 2650 (1995)
- [32] A. A. Aguilar-Arevalo et al., Phys. Rev. D 79, 072002 (2009)
- [33] G. Mention, et al., Reactor antineutrino anomaly, DOI: 10.1103/PhysRevD.83.073006
- [34] EPICS - Experimental Physics and Industrial Control System
www.aps.anl.gov/epics
- [35] Daya Bay Project Technical Design Report 3rd Draft December 7, 2007. 4.5.6 PMT High Voltage System.
- [36] Daya Bay Project Technical Design Report 3rd Draft December 7, 2007. 6.2.2 Water Shield PMT Layout.
- [37] Daya Bay Project Technical Design Report 3rd Draft December 7, 2007. 6.3 Resistive Plate Chambers(RPC).
- [38] Daya Bay Project Technical Design Report 3rd Draft December 7, 2007. 7.1 RPC Front-End Electronics.
- [39] 陈锡辉, 张银鸿 《LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通》, 清华大学出版社, 2007年7月。
- [40] Xihui Chen, Xiaoxi Xie, et al. Design and implementation of the BESIII detector-control system. Nucl. Instr. and Meth. A (2008), doi:10.1016/j.nima.2008.04.072
- [41] http://dim.web.cern.ch/dim/dim_intro.html
- [42] <http://www.mysql.com/>
- [43] [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms710252\(VS.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms710252(VS.85).aspx)

- [44] <http://jeffreytravis.com/lost/labsql.html>
- [45] (美) Ryan K.Stephens, Ronald R.Plew <Database Design> 何玉洁等译 机械工业出版社 2001年9月。
- [46] Chen.X.H.et al. Design and implementation of the detector control system for the BESIII drift chamber cosmic ray test
- [47] (美) Tim Parker, Mark Sportack 《TCP/IP 技术大全》，机械工业出版社，2000年7月。
- [48] <http://www.wiener-d.com/products/29/77.html>
- [49] W-IE-NE-R Company WIENER-CRATE-MIB description
- [50] C.Gaspar, M.Donszelmann. DIM A Distributed Information Management System for the DELPHI Experiment at CAEN
- [51] 陈锡辉, 张银鸿 《LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通》，清华大学出版社, 2007年7月。第21章 定时结构与同步技术
- [52] Wang Wei. Summary of the AD Lid Instrumentation. Daya Bay Document 5824-v4
- [53] <http://subversion.apache.org/>
- [54] Janet M. Conrad, William C. Louis, Michael H. Shaevitz, The LSND and MiniBooNE Oscillation Searches at High Δm^2 , arXiv:1306.6494v1 [hep-ex] 27 Jun 2013
- [55] J. M. Conrad, C. M. Ignarra, G. Karagiorgi, M. H. Shaevitz and J. Spitz, arXiv:1207.4765 [hep-ex].
- [56] B. Armbruster et al. [KARMEN Collaboration], Phys. Rev. D 65, 112001 (2002) [hep-ex/0203021].
- [57] H.Kwon et al., Phys. Rev. D 24, 1097(1981).
- [58] K. Nakamura et al. (Particle Data Group), J. Phys. G 37, 075021 (2010)
- [59] [19] Th. A. Mueller, D. Lhuillier et al., arXiv: 1101.2663 [Phys. Rev. C (to be published)]; Th. A. Mueller, Ph.D thesis, Paris-Sud XI University, 2010.
- [60] K. Schreckenbach et al., Phys. Lett. B 99, 251 (1981)
- [61] F. von Feilitzsch, A. A. Hahn, and K. Schreckenbach, Phys. Lett. B 118, 162 (1982)
- [62] F. P. An et al. Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay, DOI:10.1103/PhysRevLett.108.171803
- [63] F. P. An et al. Spectral Measurement of Electron Antineutrino Oscillation Amplitude and Frequency at Daya Bay, DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.061801

- [64] J. Beringer et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 86, 010001 (2012), Sec. 13.
- [65] Our Δm_{ee}^2 definition is consistent with H. Minakata, H. Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal, Phys. Rev. D 74, 053008 (2006).
- [66] Antonio Palazzo et al. Constraints on very light sterile neutrinos from θ_{13} -sensitive reactor experiments. arXiv:1308.5880v2 [hep-ph] 31 Oct 2013
- [67] F. P. An et al. Improved measurement of electron antineutrino disappearance at Daya Bay, PACS: 14.60.Pq, 29.40.Mc, 28.50.Hw DOI: 10.1088/1674-1137/37/1/011001
- [68] 章飞虹博士论文：“大亚湾中微子实验中微子事例率与能谱的测量”，中国科学院大学博士学位论文
- [69] Flyckt S O et al. Photomultiplier Tubes Principle and Applications, Photonis, 2002
- [70] 陈晓辉博士论文：“大亚湾中微子实验中心探测器检漏及精确模拟”，中国科学院大学博士学位论文
- [71] 于泽源博士论文：“大亚湾中微子实验刻度重建及中微子丢失研究”，中国科学院大学博士学位论文
- [72] Zhao J. et al. Chin. Phys. C, 2013-0363
- [73] Fengpeng An, Daya Bay Neutrino Experiment DocDB 7580
- [74] Weili Zhong, Daya Bay Neutrino Experiment DocDB 8788
- [75] P. Huber, Phys. Rev. C 84, 024617 (2011)
- [76] Jun Cao, Daya Bay Neutrino Experiment DocDB 105,
- [77] Zhan Liang, Daya Bay Neutrino Experiment DocDB 1645,

发表文章

1. 张书华等, Detector control system for DayaBay Reactor Neutrino Experiment, Sci China Tech Sci, 2013, 56:1966-1973, doi:10.1007/s11431-013-5266-6
2. 钱森, 张书华等, BESIII MUON 气体监测器数据获取系统。核电子学与探测技术, 2008 年 3 月, 第 28 卷第 2 期。
3. 钱森, 张书华等, BESIII MUON 气体监测器的研制与安装测试。核电子学与探测技术, 2008 年, 第 4 期。

致谢

在高性能所的研究生生活中，我学到了丰富的专业知识；学到了学习和科研的方法；遇到了很多将对我一生产生重要影响的人，在此我要向他们表示我最衷心的感谢！

感谢我的博士生导师王贻芳研究员在我博士学习期间给予的指导与关怀。王老师在学术上严谨求实，对工作认真负责，这些精神在我五年的博士学习期间一直伴随我左右，必将对我以后的人生产生深远的影响。王老师虽然工作极为繁忙，但是仍然尽量每周对我们进行一次辅导。在每一次辅导中，不论是对我的直接辅导，还是在王老师对其它同学的辅导中，王老师那高瞻远瞩的看待问题的方式，提纲挈领的解决问题的思路，时常让我感觉醍醐灌顶，这些看待问题和解决问题的方式方法将成为我一生的宝贵财富。

在技术支持组的工作中我得到了很多老师和同学的帮助，在此向他们表示感谢！

感谢技术支持组组长李小南研究员给予我的指导和帮助。李老师为人平易近人，对工作认真负责，对组员的工作分配开明民主，对本组的工作方向的正确把握及预见性，从中我学到了很多。李老师平时非常注重为我们创造很好的学习工作环境，使我们可以将全部精力放在工作上，而不会被其它事情所羁绊，大大提高了我们的工作效率，同时使我们保持了良好的工作心态。

感谢技术支持组副组长叶梅副研究员给予我的指导和帮助。叶老师为人和蔼热心，对工作认真负责。在对技术细节的讨论中，叶老师非常耐心而且从不急躁。从叶老师那里我不仅学到了很多知识，她那种平和的心态更令我印象深刻。

感谢技术支持组闵建、张银鸿和罗小兰老师给予我的指导和帮助。在工作中时常会与他们交流一些技术问题，他们丰富的经验使我受益匪浅，少走了很多弯路，同时积累了很多处理问题的巧妙方法。

感谢我的师兄钱森、陈锡辉，在我刚回所的日子里，是他们帮助我快速适应了高性能所的科研环境，并为我后面的工作打下了良好的基础。感谢我的同学曾磊、张宜宁、徐俊、唐文娟等对我的帮助以及对此论文所做出的贡献。

开发探测器控制系统本地监控系统时，在一些子系统的整合中，我得到了很多合作组成员的帮助，正是在他们的帮助下，使这些子系统的整合工作得以顺利完成。感谢威斯康星大学（University of Wisconsin）的王维、Paul Hinrichs 等；弗吉尼亚理工大学（Virginia Polytechnic Institute and State University）的孟月等；香港中文大学的 Ramond Kwok 等；东莞理工大学的张志坚等。

在大亚湾实验中离线软件组的工作，我也得到了很多老师和同学的帮助，在这里向他们表示衷心的感谢！

感谢曹俊研究员和山东大学的王萌教授给予我的指导和帮助。两位老师平易近人，对问题的透彻分析都给我留下了深刻印象。两位老师在很多问题的解决方法，给我指明了方向，使我少走了很多弯路。

感谢师兄何苗、占亮、温良剑、路浩奇、王志民等给予我的帮助。在我每次遇到问题，一筹莫展的去向他们请教时，他们都积极耐心的给我讲解，每次都能使我豁然开朗。正是由于他们无私的帮助，我的工作才得以顺利完成。

感谢我的同学徐吉磊、李小波、王玲玉、张一纯、陈晓苏、宁哲、陈晓辉等给予我的帮助。还记得那些和他们一起讨论问题的时光，是他们启发了我更多的思路，给我的工作带来了极大的帮助。

感谢我的父母和家人对我生活上的照顾以及工作上的支持。和他们一起生活的那些点点滴滴将伴我一生，平安快乐的生活是他们对我最大的希望，也是我回报他们最好的方式！