

CNIC-01869

CAEP-0181

# 大面积中子闪烁探测器阵列技术研究

陈家斌

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳, 621900)

## 摘 要

介绍了在神光Ⅲ原型上建立大面积中子闪烁探测器阵列用于诊断压缩密度的具体方法, 其中包括物理实验原理、探测器工作原理、电子学系统设计和探测器系统对靶室等环境的要求。给出了各部件的具体参数, 分析了影响探测系统性能的主要因素, 并提出了建立大面积中子闪烁探测器阵列的实现途径。

**关键词:** 压缩密度 大面积中子闪烁探测器阵列 设计方案

# Technique Investigation on Large Area Neutron Scintillation Detector Array

*(In Chinese)*

CHEN Jiabin

(Research Centre of Laser Fusion, CAEP, Mianyang, 621900)

## ABSTRACT

The detailed project for developing Large Area Neutron Scintillation Detector Array (LaNSA) to be used for measuring fusion fuel area density on Shengguang III prototype is presented, including experimental principle, detector working principle, electronics system design and the needs for target chamber etc. The detailed parameters for parts are given and the main causes affecting the system function are analyzed. The realization path is introduced.

**Key words:** Large area neutron scintillation detectorarray, Area density, Design plan

## 引言

ICF 的最终目标是实现高温高密度热核点火。因此,研究聚变燃料离子温度和高密度  $\langle\rho R\rangle$  是极其重要的。随着 ICF 精密物理的发展以及“神光 III”原型的建立,迫切需要开发高密度  $\langle\rho R\rangle$  诊断技术。从价格和安全性考虑,无论是目前国际上进行的内爆实验还是在将来的“神光 III”原型及主机上进行的内爆实验,主要都不是用氘靶,而是以充纯氘燃料靶为主。通过测量纯氘靶的次级中子能谱,可以给出  $\langle\rho R\rangle$ 。在这种低产额下,大阵列中子探测器系统目前几乎是国际上使用的唯一探测手段,已成 ICF 中诊断  $\langle\rho R\rangle$  的标准技术。这种技术的研究和设备的建立不仅具有非凡的实用价值,同时还可以展示一个国家在 ICF 研究领域的综合实力。另外,对于“神光 III”原型上将进行的一些非对称内爆实验,初级 DD 中子产额也在  $10^5 \sim 10^6$  范围,多道中子探测器系统还可以给出离子温度  $T_i$  (可以测到几百 eV 以下的  $T_i$ )。国际上目前已建成四套用于  $\langle\rho R\rangle$  诊断的多道中子探测器系统:即 20 世纪 90 年代初期建立在 Livermore Nova 装置上的 LaNSA;90 年代中期建立在 Rochester 大学 Omega 上的 MEDUSA;90 年代中在 Osaka 大学 GEKKO VII 上建立的 MAMDALA 及 2004 年建立在卢瑟福实验室的 LaNSA。

图 1 是 Livermore 实验室 Nova 装置上的 LaNSA。阵列由 960 个独立的闪烁体—光电倍增管组成,闪烁体是 BC505 液体闪烁体,尺寸为 10 cm 的正方体。探测器尺寸超过 4 m。LaNSA 放在靶室正下方 20 m 处。探测系统时间响应 2.3 ns。当 Pb 厚 7.6 cm 时,DT 中子探测效率 27%,可探测产额  $2.3 \times 10^5$  以上的 DT 中子。

1998 年,日本在 GEKKO VII 上建成了多道中子谱仪 MAMDALA,如图 2 所示。它由两套 421 道的阵列组成,共 842 道。闪烁体尺寸为  $\phi 10.5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。MANDALA 放在地面,仰角  $30^\circ$ ,中子飞行距离 13.5 m,探测水平为  $1 \times 10^5$  个 14.1 MeV 中子。MAMDALA 可以观测不同角度的中子谱,不仅可以用来测量  $T_i$  和  $\rho R$ ,还可以用来研究中子的各向异性,例如研究在超强激光实验中的中子是热核聚变中子还是光核反应中子。

## 1 原理

### 1.1 物理测量原理

已知中子 Doppler 展宽与燃料离子温度之间的关系为

$$\Delta E = C\sqrt{T} \quad (1)$$

式中  $T$  和  $\Delta E$  均以 keV 为单位。对 DT 中子,  $C=177$ ; 对 DD 中子,  $C=82.5$ 。设中子源到探测器的距离为  $L$ , 中子能量  $E$  和飞行时间  $t$  的关系为

$$t = \frac{72.3L}{\sqrt{E}} \quad (2)$$

式中  $L$ ,  $E$  和  $t$  的单位依次为 m, MeV 和 ns。对式(2)微分,并将中子的平均能量(14.1 MeV 和 2.45 MeV)及式(1)代入得

$$T = 68 \frac{\Delta t^2}{L^2} \quad (\text{DT 中子}) \quad (3)$$

$$T = 1.65 \frac{\Delta t^2}{L^2} \quad (\text{DD 中子}) \quad (4)$$

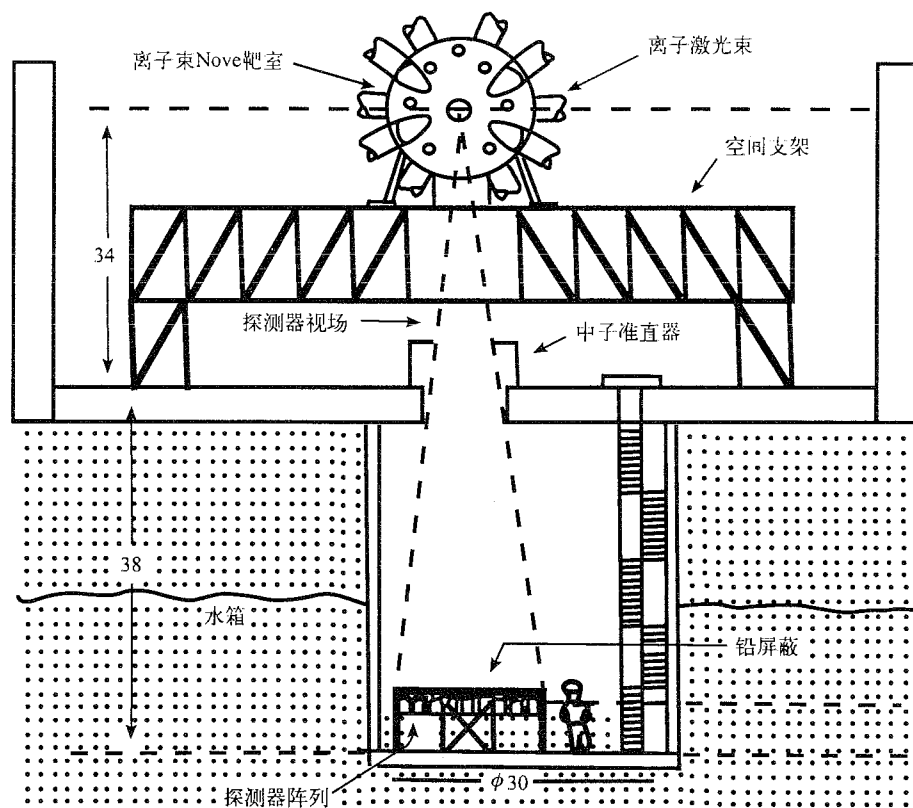
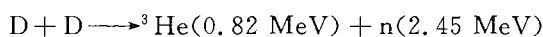
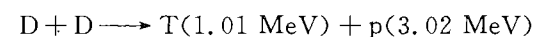


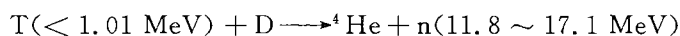
图1 LaNSA几何布置(单位:英尺)

式中  $L$ ,  $\Delta t$  和  $T$  的单位依次为 m, ns 和 keV。给出中子飞行时间谱  $V(t)$  后便可得到  $\Delta t$  及中子能谱, 由此得到离子温度  $T$ 。如果探测系统的时间响应好于 2.5 ns, 由式(3)和式(4)知: 当中子飞行距离  $L=20$  m 时, 可以测量 1 keV 以上的离子温度(DT 中子)和 30 eV 以上的离子温度(DD 中子)。

在充纯  $D_2$  燃料靶中, 初级反应为



次级反应为



$$Y_{DT} \propto \sigma \langle \rho R \rangle Y_{DD}$$

在低密度情况下, 即燃料的半径小于  $T$  的半个射程 ( $\langle \rho R \rangle < 0.1 \text{ g/cm}^2$ ) 情况下, 认为  $T$  同  $D$  结合以前没有与  $D$  发生过碰撞, 即认为  $T$  是单能的 (1.01 MeV), 这时  $\sigma$  是常数, 由次级 DT 中子与初级 DD 中子产额之比  $Y_{DT}/Y_{DD}$  可以确定燃料面密度。对于更大的  $\langle \rho R \rangle$ , 燃料中聚变产物  $T$  同  $D$  结合以前被热化, 这时  $\sigma$  不是常数, 由  $Y_{DT}/Y_{DD}$  不能确定燃料面密度, 但由次级 DT 中子能谱可以确定  $T$  的慢化谱, 从而推出  $\langle \rho R \rangle$ 。

## 1.2 探测器工作原理

大面积闪烁探测器阵列由 960 个独立的闪烁体—光电倍增管组成, 每个探测器只测量

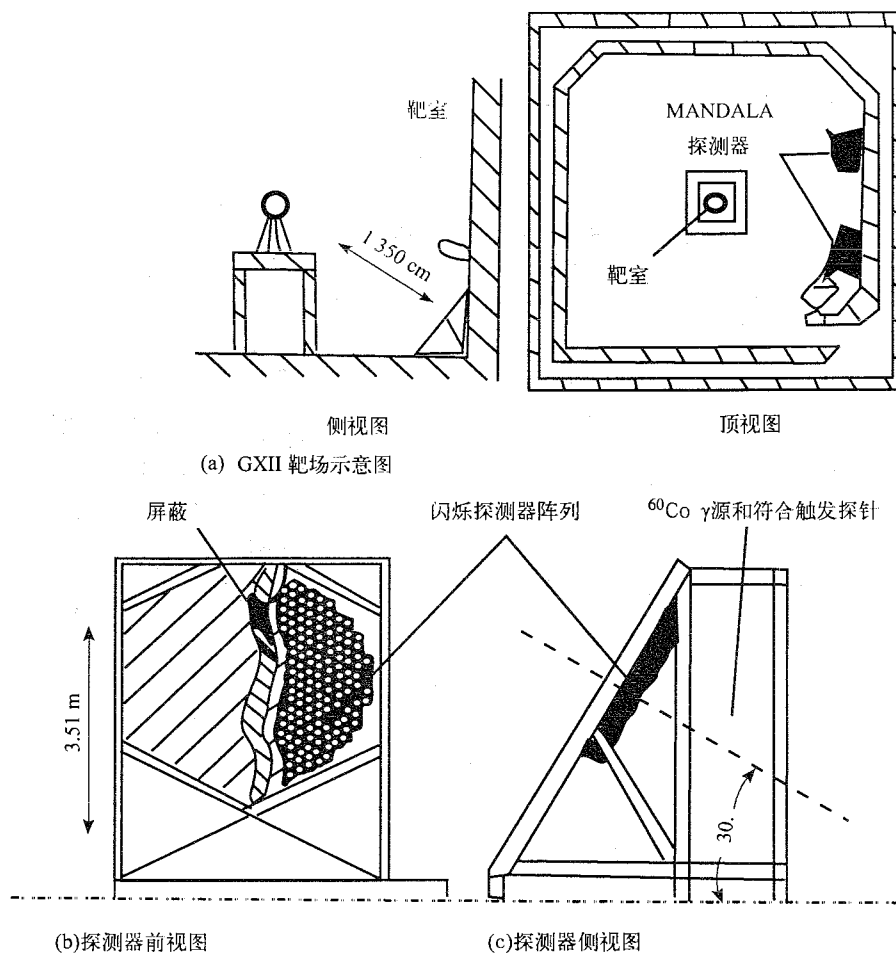


图2 MANDALA 布置

第一个到达探测器的中子。每道探测器的输出信号经过 TDC 和 ADC 进入计算机。典型的测量结果为平均每个探测器有 0.1~0.5 个计数, 即有 100~500 个探测器各自测到 1 个计数, 将这 100~500 个粒子数组成一条中子飞行时间谱(TOF), 从而得到中子能谱。

探测器的测量范围为 100~500 个计数, 即平均每个探测器有 0.1~0.5 个计数, 于是动态范围只有 5 倍。扩大探测器动态范围的方法是通过多次碰撞方式来操作探测器。即使当每一道平均探测到 3 个计数时, 仍然有 10% 的道数只探测到 1 个计数, 去除有脉冲堆积那些道数的记录数据, 这样动态范围由原来的 5 倍提高到 30 倍。

## 2 多道探测器设计

### 2.1 物理设计

“神光Ⅲ”原型上次级中子产额以  $10^5 \sim 10^6$  为主, 需要测量这个范围的中子能谱。

闪烁体尺寸  $\phi 10.16 \text{ cm} \times 10.16 \text{ cm}$  ( $\phi 7.62 \text{ cm} \times 7.62 \text{ cm}$ ), 闪烁体有效面积  $7.783 \times 10^4 \text{ cm}^2$  ( $4.378 \times 10^4 \text{ cm}^2$ ), 中子飞行距离 18 m, 探测器立体角占  $4\pi$  空间份额  $\Omega = 1.91 \times 10^{-3}$  ( $1.075 \times 10^{-3}$ ), 设 DT 中子本征探测效率  $\epsilon_{\text{DT}} = 27\%$  (20%), 则总探测效率  $\eta = \epsilon \times \Omega$

$=5 \times 10^{-4}$  ( $2.15 \times 10^{-4}$ ), 中子探测水平为  $2 \times 10^5$  ( $5 \times 10^5$ )。光电倍增管是国产的, 让整个探测器的时间响应好于 1 ns。

表 1 是中子探测器阵列基本参数的比较。

表 1 几个中子探测器阵列基本参数的比较

激光装置	Nova	GEKKO Ⅱ	神光Ⅲ原型	
阵列名称	LaNSA	MANDALA		
中子飞行距离/m	20	13.50	18	
立体角份额 $\Omega$	$1.91 \times 10^{-3}$	$3.18 \times 10^{-3}$	$1.91 \times 10^{-3}$	( $1.075 \times 10^{-3}$ )
探测效率 $\epsilon_{DT}/\%$	27 (阈值约 100 mV)	30 (阈值约 50 mV)	27	(20)
总效率 $\eta = \epsilon\Omega$	$5 \times 10^{-4}$	$9.6 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	( $2.15 \times 10^{-4}$ )
中子探测水平	$2 \times 10^5$	$1 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	( $5 \times 10^5$ )

对于 18 m 的飞行距离, DT 中子比 X 光晚 300 ns 到达探测器, 而 DD 中子比 DT 中子晚 480 ns 到达探测器。这之间有足够的时间记录另外的脉冲信号。将记录系统中的 TDC 和 ADC 缩减为原来的 1/2 或 1/3, 让 2 个或 3 个探测器共享一个记录系统, 这样可以极大地降低成本而不影响实验精度。

## 2.2 靶室开孔设计

如果闪烁体直径 10.16 cm (7.62 cm), 则探测器外壳内径为 11 cm (8.6 cm) 较合适。外壳厚 0.2 cm, 则探测器外壳外径 11.4 cm (9 cm)。设每个探测器所占尺寸为 12.5 cm  $\times$  12.5 cm (10 cm  $\times$  10 cm), 则总面积  $S = 12.5 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm} \times 960 = 1.5 \times 10^5 \text{ cm}^2$  (或  $9.6 \times 10^4$ ), 由此得阵列直径  $D = 4.4 \text{ m}$  (3.5 m)。已知靶室外径 2.5 m, 于是靶室壁上需有一个  $\phi 30 \text{ cm}$  的薄的法兰盘。

把 960 道的阵列做成两套, 每套 480 道, 放在两个方向, 这样还可以研究中子的各向异性。每套阵列的面积  $7.5 \times 10^4 \text{ cm}^2$  (或  $4.8 \times 10^4 \text{ cm}^2$ ), 直径 3.1 m (2.5 m), 靶室壁上需有一个  $\phi 22 \text{ cm}$  的薄的法兰盘。

## 2.3 探测器支架及屏蔽体

以靶心为球心在探测器放置处设计两个球面形的探测器支架。每个支架有 480 个小格, 每个探测器可以在小格里自由取放。每个支架前做两道 Pb 屏蔽门, Pb 厚度分别为 1 cm 和 3 cm。

## 2.4 电子学系统

图 3 是谱仪的电子学系统结构图。

探测器输出信号经过信号分配器分成电荷信号和时间信号, 电荷信号经过放大后送入 QDC 进行幅度测量, 信号的幅度信息将用于对幅度游动效应的修正。时间信号经过定时甄别后作为时间测量组件 TDC 的起始信号, 激光触发信号经过甄别成形和延迟后作为所有 TDC 的公共停止信号。激光触发信号与中子之间的时间间隔为中子的飞行时间。

# 3 中子谱仪的时间分辨

## 3.1 影响时间分辨的主要因素

设计时要考虑影响时间分辨的主要因素, 即: 探测器的固有时间分辨、电子学系统的时

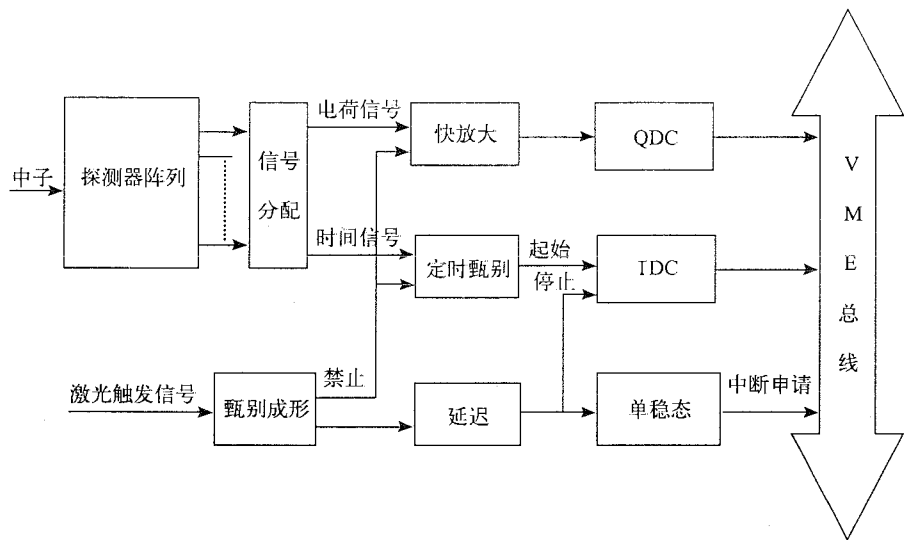


图3 谱仪的电子学系统结构图

间晃动、幅度游动效应、通道一致性和通道间串扰。这些问题直径关系到整个系统的测量精度。

(1) 探测器的固有时间分辨

当采用闪烁计数器作为谱仪的探测器时,影响时间分辨的因素主要有三个:一是闪烁体的发光时间;二是光电倍增管(PM)中电子渡越时间分散;三是由噪声引起的涨落。电子传输时间的变化主要由电子的传输路径不同和光阴级发射电子的能量不同引起的,其时间晃动为:

$$\Delta t = -\sqrt{\frac{2m_e W}{e^2 E^2}}$$

其中  $m_e$  为电子质量,  $e$  为电子电荷量,  $E$  为电场强度,  $W$  为电子垂直于光阴极的动能。

(2) 电子学系统的时间晃动

由于噪声的影响,不仅会使信号的定时沿的形状发生变化,影响定时精度;同时噪声也会叠加在比较器的基准电平上,使测量产生误差。

(3) 幅度游动效应

探测器的输出幅度与入射粒子的能量、入射粒子在探测器中的路径以及入射粒子在探测器中的电离过程有关,符合高斯分布,由输出幅度不同引起的定时误差称为幅度游动效应。减少幅度游动效应常用的方法是进行时间测量的同时,也对信号的幅度进行测量,然后进行离线修正。

(4) 通道一致性

由于 TOF 谱仪中有 960 个探测器通道,不同通道的时间分辨的差别将会对总的时间分辨产生影响。

(5) 通道间串扰

在多通道探测器系统中,当某个通道有信号时,与其相邻的几个通道会出现小的干扰信号,这种现象称为“串扰”。如果串扰信号叠加到真信号上,就会对测量产生影响。一般情况

下,串扰信号的幅度不大,对幅度测量的影响不大,但如果作时间测量,有可能产生比较大的影响,通常会产生 40~400 ps 的测量误差。引起串扰的因素很多,空间感应、地线电源线跳动、电路板的分布参数的耦合,以及芯片内部的固有串扰等都是产生通道间串扰的因素。

### 3.2 电子学系统误差

谱仪总的时间晃动为:

$$\sigma_{\text{总}}^2 = \sigma_{\text{探}}^2 + \sigma_{\text{激}}^2 + \sigma_{\text{电}}^2$$

其中  $\sigma_{\text{探}}$  为探测器的固有时间晃动,  $\sigma_{\text{激}}$  为激光触发信号的时间晃动,  $\sigma_{\text{电}}$  为电子学产生的时间晃动。如果谱仪总的时间分辨为 100 ps,  $\sigma_{\text{探}}$  为 80 ps,  $\sigma_{\text{激}}$  为 45 ps, 则  $\sigma_{\text{电}}$  约为 40 ps。电子学的时间晃动主要来自定时晃动、TDC 最小分辨、公共停止信号晃动等因素。

## 4 谱仪系统实现路径

为了达到最终的设计要求,谱仪系统的实现将分成三个阶段:原型设计,单元组件设计和系统集成。

### 4.1 原型设计

原型设计将根据物理目标提出的要求,建立一个基于 VME 总线标准的 16 个通道的飞行时间谱仪原型系统。建立原型系统的目的有两个:一是对飞行时间谱仪本身进行研究,研究如何满足谱仪时间分辨需求、总的时间分辨和各部分时间误差的分配,以及软件系统的开发;二是利用原型系统对组件进行测试,以保证各组件误差小于所分配的误差。在大型谱仪系统的设计和使用中,测试系统对关键组件的选型和开发、提高组件的性能价格比都将起到很重要的作用。

图 4 给出了原型设计的框图。基于上述两个目的,为了能在尽可能短的时间里建立起

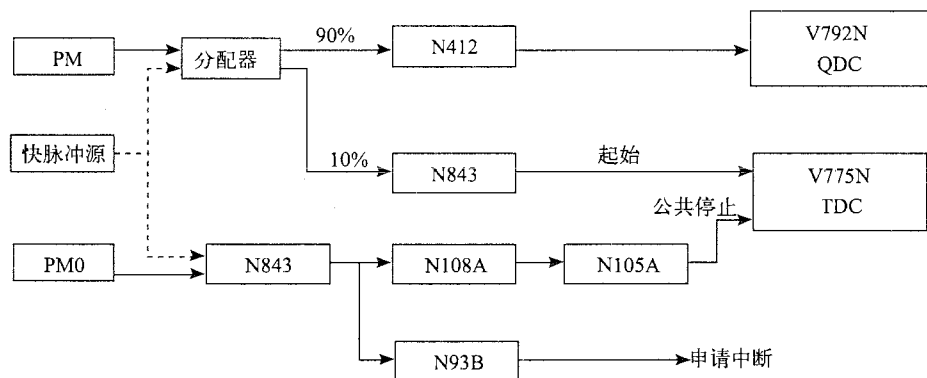


图 4 原型设计的框图

系统,原型系统将尽可能选用商用产品,这里大部分采用的是 CAEN 公司的产品。

光电倍增管(PM)输出信号或脉冲源信号经过电荷分配器,按电荷量 1:9 分成两路,一路经快放大(N412)后送入 VME QDC(V792N)进行电荷测量,用于幅度波动效应修整;另一路送入恒比定时甄别器(N843)进行时间甄别,甄别器输出作为 TDC(V775N)的起始信号。光电倍增管 0(PM0)的输出经 N843 甄别后,再经过适当的延迟,作为 TDC 的公共停止



信号。PMO 输出由定时成形器(N93B)产生系统的中断信号。图 4 只是给出一种可能的原型系统的实现方案,图中的设备可用其他公司的相关产品替代或自行设计研制。

为了使两个光电倍增管的输出在时间上有关联,测试时采用一个闪烁体,两个光电倍增管分别放置在闪烁体的两端进行双端读出。如果只进行电子学测试,则用脉冲源代替光电倍增管。

#### 4.2 单元组件设计

由于谱仪对时间分辨的要求比较高,通道数目较多,电子学部分的总体测量分辨为 40 ps,同时要求其具有很高的稳定性,因此对每一个将使用在谱仪中的电子学设备不管是商用产品还是自己开发的组件都必须经过测试,以确保在时间分辨和稳定性方面满足要求。由于通道数目比较多,商用产品价格昂贵,从成本和集成装配的角度考虑,对其中的部分组件利用我们现有的成熟技术进行重新设计。对于无商用产品的组件,只能自己开发,如电荷分配器、快脉冲源等。

#### 4.3 系统集成

系统集成包括硬件组装和软件开发两部分。图 5 给出了电子学硬件设备总框图。

软件包括两部分:一是用于硬件测试的软件,它包含了对不同硬件设备的测试方法和测试标准;另一部分是用于中子飞行时间测量的软件,它包含中子飞行时间的测量方法,修正数据库,在线控制,物理分析以及与 ICF 系统中其他系统的接口等。

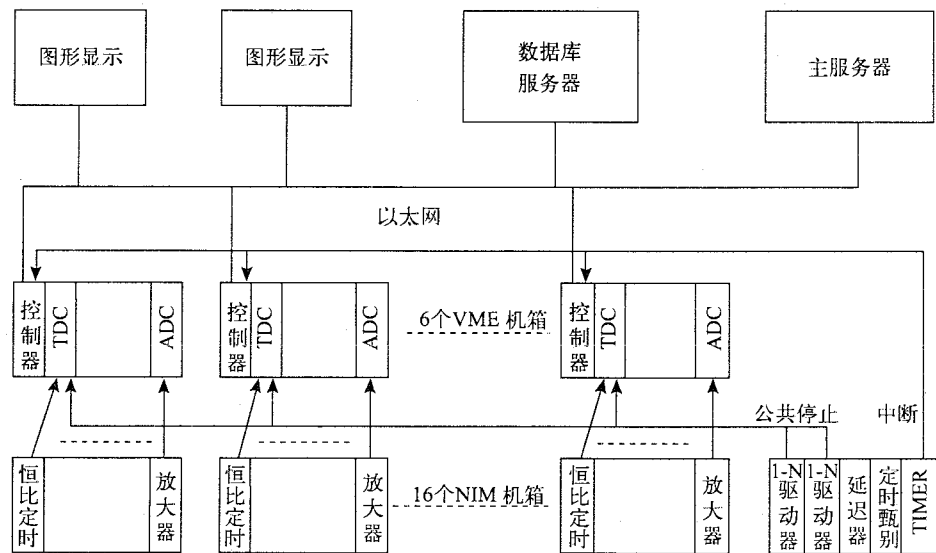


图 5 电子学硬件设备总框图

## 5 测试

### 5.1 测试系统

原型系统实际上就是一个测试系统,利用这个系统可以进行探测器测试、电子学组件测试、通道一致性测试、串扰测试、稳定性测试,以及软件的开发和调试。

## 5.2 组件测试

对每一个要用在谱仪上的探测器和电子学设备都要经过仔细的测试,以确保其性能指标满足要求。各组件的测试数据将保存在数据库中,以便将来用于数据修正。

### (1) 探测器

测试内容:PM 坪曲线,放大倍数,输出波形,时间响应,时间晃动等。

测试方法:测试系统如图 4 所示,将被测探测器替换图中的探测器,测量时间分辨和幅度,同时用示波器观察探测器输出波形。

### (2) 电子学组件

测试内容:电子学组件中每一个通道的时间响应和晃动,放大倍数,组件中通道的一致性。主要测试的组件有:定时甄别器,TDC,放大器,QDC。

测试方法:测试系统如图 2 所示,将被测电子学组件替换图中的探测器,测量时间分辨和幅度。

## 5.3 系统测试

### (1) 一致性

这里的一致性包括了探测器和电子学组件的整体一致性,虽然在建立系统时对每一个安装在系统中探测器和电子学设备的一致性都有严格的要求,但仍然需要对每一个通道从探测器到电子学输出的一致性进行测试,使其整体一致性满足要求。测试数据将保存在数据库中,以便将来用于数据修正。

### (2) 串扰

在多通道系统中,串扰是不可避免的,对时间测量系统,当定时沿受到串扰信号影响时,将会带来很大的测量误差,由其引起的定时时间晃动大约在 40~200 ps 之间。串扰主要发生在相邻通道之间。由于串扰具有随机性,捕捉比较困难,所以对其测量需要一些特殊的手段和设备。

### (3) 稳定性

谱仪实际使用时通常是连续运行数小时到数周,因此谱仪的长期稳定性指标尤为重要,通常要求 24 h 偏差小于 100 ps。

### (4) 软件可靠性

对硬件的测试过程实际上也在检验软件的可靠性。软件的开发过程应遵循螺旋模型开发原则,在测试应用中发现问题的,并加以解决。

### (5) 标定

在正式用于中子测量之前,需要对系统进行标定,包括 TDC 步长标定、公共停止信号的延迟标定、QDC 量程标定、探测器标定、幅度游动修正系数标定等。标定的数据将保存在数据库中,用于将来的数据修正。

## 5.4 中子源测试

谱仪最终是要用于中子飞行时间的测量,因此在正式用于神光实验之前还需要进行中子源测试,以确定对中子测量的实际分辨和在此分辨下的飞行时间谱能否满足物理需求。