

高能物理实验中的快电子学

方 澄

高能物理实验对电子学的要求

高能物理实验广泛利用了电子学各方面的成果。而且,由于高能物理是一个迅速发展的前沿学科,它对电子学的要求是很高的。

用记录高能粒子在探测器中产生的电脉冲来进行的实验,叫做计数器电子学实验。一个这样的实验常常需要一系列的多丝室和漂移室,许多闪烁计数器和契伦科夫计数器,以及其它设备。这些探测器所给出的电信号,一般都需要由电子学线路来对它们进行预先的处理(例如放大、甄别、成形、符合选择、中间存贮以及把时间信息或幅度信息变换成数码等等),通过各种手段鉴别它们是否是我们所要观察研究的事例,然后,如果是的话,把有关数据送到计算机去进行处理。在实验进行的过程中,计算机不断接受、分析实验数据,并显示实验结果,以便实验者能及时了解实验进行情况并控制实验的进行,这就是在线计算机。但是虽然如此,大部分数据是计算机来不及即时分析的。它们将被计算机记入磁带,由大型计算机在事后进行离线分析。

图1(b)是一个示意图,说明一个最简单的高能物

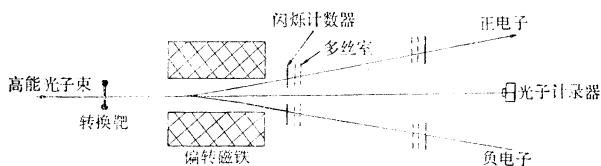
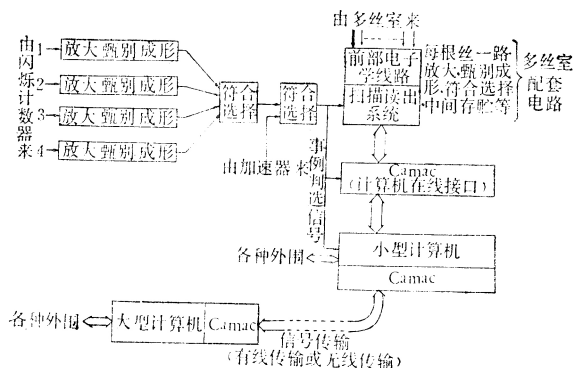
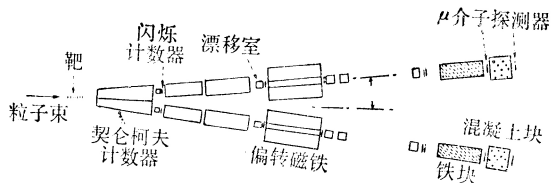


图1(a) 一个简单的高能光子实验布局示意图



图(b) 是图1(a)实验中的电子学系统



(c) 一个实验装置的主要设备示意图

理实验图1(a)可能需要那些电子学单元。图1(c)是另一个示意图,说明某个实验的主要设备,它们都配有相应的电子学设备。据估计,一个计数器电子学实验常常需要几百个快电子学插件,一系列的Camac插件,几千根乃至几万根丝的多丝室或漂移室的配套电子学线路,系统是很庞大复杂的。而且实验进行的时间较长,往往需要几个月乃至半年、一年。

这就必然要求电子学有很高的可靠性(而且最好有较低的造价和功耗),这是高能电子学的第一个特点。

高能实验往往是观察稀有事例,因此常常希望加速器束流较强,产生大量的反应,然后把这些反应中绝大部分我们不需要的反应筛选掉,把我们所需要的反应一个不漏地挑出并记录下来进行研究。这个过程叫做事例判选,它是由许多探测器和大量的逻辑电路共同完成的。如果它们判定这个事例符合我们的条件,就给出一个信号,起动后面的电子学线路和计算机,把数据记录下来。由于束流很强、粒子又很多,而且事例判选必须在较短的时间里完成,所以,所用的探测器如闪烁计数器、契伦科夫计数器等都比较快,其信号的上升时间一般是一二个或几个毫微秒(10^{-7} 秒),并且要在高计数率下工作。因此,后面的电子学线路必须有很快的响应速度,很高的时间分辨本领,并且能适应很高的计数率。一般高能物理实验用的放大器、甄别器、符合电路等等,其上升时间为2ns或更短,其可用的重复频率为100MC,150MC,甚至200MC。^[注1]

漂移室也是这样。漂移室是靠测量粒子的漂移时间来确定粒子经过的位置的,室本身的分辨约2ns,因此和它配套的复杂电子学系统测量时间的精确度也必须足够地快。同样,它也必须能适应较高的计数率。

速度的要求较高,这是高能电子学的第二个特

点。

多丝室、漂移室等的配套电子学线路是比较复杂的。丝的数目也很多,可以达几千、几万。而且使用的计数率也很高,每秒计数 10^5 个脉冲。

除此以外,往往还需要对许多信号进行时间的测量和幅度的分析;各个地方的计数率需要用定标器进行监测,磁铁情况和光电倍增管的电压电源也需要监测。

这样,用多个各种探测器来进行的高能物理实验,其数据量是很大的,实验进程的控制也是很复杂的。实验不可能再照老的办法进行,必须采用在线电子计算机。随着微处理机的发展,为了减轻计算机的压力,常常还需要在把信号送到计算机前用微处理机对它们进行预先的处理。为了把物理实验的数据传送入计算机和传送机间信号而发展起来的 Camac 系统,是一种复杂的、高速度的逻辑系统,采用了许多计算机方面的技术,并且发展了自己的软件。随着实验能量的提高,更快的系统也在研究中……。总之,高能物理实验中数据处理的工作很吃重,电子学必须在这方面相应地发展,这是高能电子学的又一个特点。

高能物理实验中电子学工作远不止这些,这里就不再多说了。下面,让我们谈一谈有关快电子学的情况。

几种常用的快电子学线路

快电子学涉及的方面很多,现举几个例子。

(1) 符合电路 符合电路是很常用的电路之一,一般常用来选择所需要的事例。例如在图1(a)的实验中,只有在四个闪烁计数器都同时有信号时,才是我们所需要的事例。利用多种探测器和磁铁的组合以及位

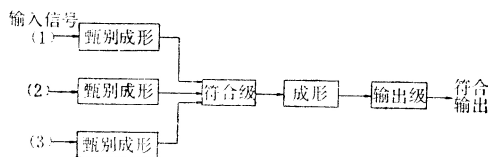


图2 (a) 一个三路符合电路

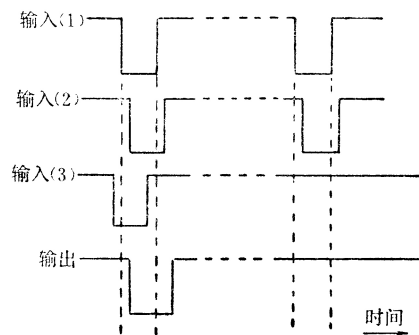
置上的巧妙安排,可以进行多种多样的选择。有时,某个探测器没有同时给出输出的现象才是我们所需要的事例,这种选择叫作反符合。配上延迟电路等等,还可以选择出有一定的时间关系的现象。

电路分辨时间的本领总是有限的。因此在一定时间间隔以内到达的粒子,虽然不是真正同时,但将被当作“同时”而记录下来,这个时间叫作分辨时间。常用的符合电路,分辨时间由若干微秒到 1ns 。符合可以是两路的或多路的,当各路都“同时”有信号到达时,给出符合输出;有时还备有反符合路,当反符合路“同时”有信号到达时,就表示此事例不是我们所需要的,符合电

路不给出输出。

图(2)是一个符合电路的大致框图。

下面引出某个符合电路的大致指标: 分辨时间: 1ns ; 路数: 五路,各路都可以用为符合或反符合(分别



由开关选择);可用重复频率: 100MC (注1)。

(2) 甄别和定时

从探测器出来的电脉冲,其幅度是大小不一

的,而且伴随着许多噪声。为了使后面的符合选择电路、时间分析电路等等能够正常工作,必须用甄别器对它进行处理。甄别器是某种形式的触发电路,它只在输入脉冲幅度大于一定值(“甄别阈”)时才给出输出。这样就可以去掉噪声(以及我们不需要的太大的信号),并且把输出脉冲成形为我们所需要的形状和幅度。

甄别器应该有较稳定的甄别阈,并且能较好地反映输入脉冲的时间。在高能实验中,后一个要求更突出。

图(3)说明甄别器在传送时间信息方面的问题。真实的输入信号总有一定的上升时间(对光电倍增管约为 $2-3\text{ns}$),因此,不同幅度的信号,到达甄别阈的时间就不同,分别为 t_1, t_2, t_3 。但是,触发过程也需要一定

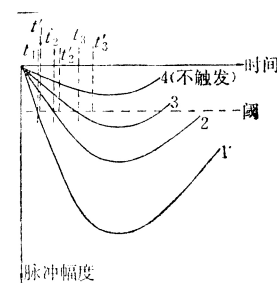


图3 由脉冲幅度不同而引起的定时差异

的时间,如果脉冲超过甄别阈比较多,触发得就快,反之,触发需要的时间就长。因此,实际给出输出脉冲的时间将分别为 t'_1, t'_2, t'_3 。也就是说,由于输入脉冲的幅度不同,输出脉冲在时间上将会有较大的移动。由上面符合电路可以看出,这个移动应该尽可能小。同时,在时间测量中,这种移动也是构成误差的主要来源。为减小移动,进行了很多研究。一般高能实验所用的甄别器,其本身的移动小于 1ns 。采用特殊的定时技术,可以做到小于几百或几十个 ps ($1\text{ps} = 10^{-12}$ 秒)。

(3) 放大器 放大器能把探测器的信号放大到需要的幅度,以便后面的线路进行处理。这里和中、低能

实验的不同是,中、低能实验对线性、长期稳定性和噪声的要求更高些,而高能实验中速度的要求更高些.一般高能中常用的放大器,放大倍数 10 倍到上百倍,上升时间 1—2ns,采用负反馈电路使它仍具有一定的线性和稳定性.

由于探测器信号的计数率很高,整个放大器都采用直流耦合,以避免由计数率引起放大器输出处直流电位的漂移.这就要小心地进行温度补偿,使得当环境温度变化引起晶体管参数变化时,输出处的直流电位仍能不变.

还应一提的是,随着探测器的发展,高能中幅度测量技术的应用在增加,对放大器的线性、稳定性和噪声的要求也在提高中.

(4) 时间测量和幅度分析 时间测量:在中低能实验中,要测量微秒、毫微秒量级的时间间隔,一般是把它变成相应的脉冲幅度,送到多道分析器去分析.在高能实验中,因为数据要送入计算机,更方便的是把它变成数码.

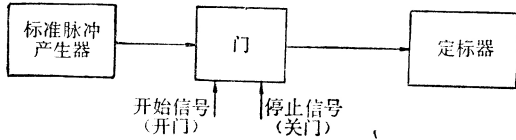


图 4(a) 用计数方法测量时间

最直观的方法是直接计数法(图 4a)。用开始信号打开一个门,然后用停止信号关闭它,记录通过这个门的具有固定频率的脉冲的数目,就可以得知相应的时间.

如果被测的时间间隔较短,那么,较好的办法是把短的时间间隔成比例地放大,这就是时间扩展法,图 4(b)是它的示意图.由开始脉冲把一个恒定的电流源接通到电容 C 上,那么 C 就以恒定的速度充电;当停止脉冲到来时关断这个电流源.这时, C 上的电压将与两脉冲间的时间间隔 t_1 成正比.如果在停止脉冲到来时同时起另一个恒流源,使 C 以恒定的速度放电,

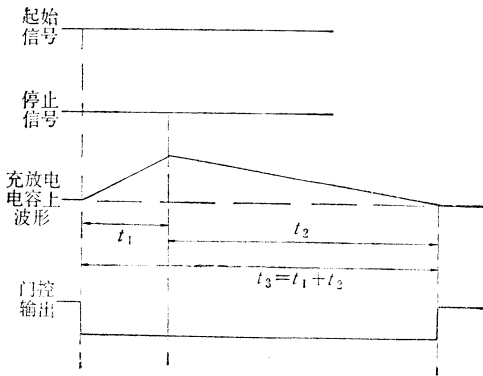


图 4(b) 时间扩展法

到 C 上电压回到原来的电压时为止,则放电所用时间 t_2 也和 t_1 成正比.用 t_3 (或 $t_3 = t_1 + t_2$) 开关一个门来进行计数,就可以测出时间 t_1 . 如果选择放电电流比充电电流小 1000 倍,也就是使放电比充电慢 1000 倍,那么 t_2 就可以比 t_1 大 1000 倍,短时间扩展成了较长的时间,就可以用较低的频率和较慢的线路,而得到较高的测量精度.

在高能实验中所要测量的时间,一般为几 ns,几十 ns 到几 μs 数量级.当然,其他的测量方法还有很多,这里就不多说了.

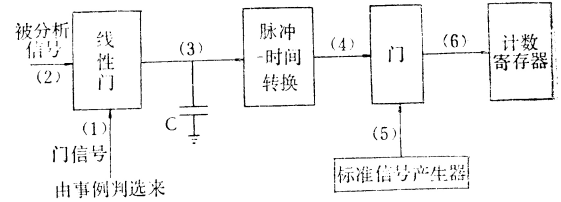


图 5 (a) 电荷-数字转换示意

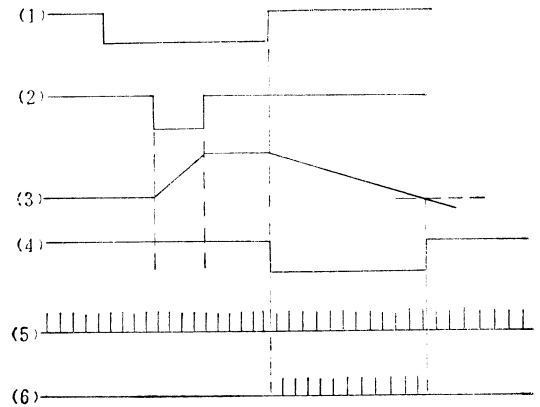


图 5 (b) 是图 5 (a) 线路各点波形示意图

幅度分析:在幅度分析方面经常需要的是测量探测器脉冲所包含的电荷,因为电荷直接反映能量.图 5(a)是电荷数字转换的示意图,图 5(b)是其波形关系示意图.待分析的信号送到线性门(经过一定延迟).这时,如果事例判选决定这个事例是需要的,就有一个信号(在被分析信号到来以前)把线性门打开,被分析信号就通过线性门对电容 C 进行充电. C 上最后得到的电压,将等于脉冲所包含的电荷.充电完毕后进行恒流放电,放电时间也将正比于电荷,可用计数法测量.所得到的数据存在寄存器里边,然后经过 Camac 接口送到计算机.线路的测量精度一般约千分之一左右,在几十个 μs 里完成.由于线性门只在有事例判选信号时才打开,就解决了高计数率的问题.

有关工艺、器件和测试设备的发展

快电子学的发展和工艺、器件和测试设备的发展

是密切不可分的,这里只略提几句。

(1) **可靠性问题** 由上面可以看出,高能物理实验的规模是很庞大的,几百上千台件仪器设备组合在一起作一个实验,而且实验常常需要持续很长时间。对仪器的可靠性是一个很严峻的考验。为了保证电子学仪器的可靠性,需要各方面的共同努力:器件的可靠性、接插件、印制板工艺、安装焊接技术等都必须采取严格的质量控制。器件要经过严格的筛选,成品也要经过详细的检验和环境条件的考验,整个设计和生产过程都必须严格把关。

(2) **专用集成电路问题** 电子计算机由于采用集成电路,大大提高了可靠性,降低了成本、功耗和体积。高能电子学也必须走这条路。不同的是,电子计算机采用的多是单片集成电路,而高能电子学由于要求的性能特殊,专用性强,又需要比较灵活易于改进和发展,除了尽可能采用一些通用的集成电路外,不得不发展自己专用的集成电路,特别是混合集成电路。

多丝室、漂移室由于所用的丝数量多,动辄几千根、几万根,而每根丝需要一个放大/甄别电路,所以对研制和生产为其专用的集成电路很重视。此外,还必须研制和生产测量漂移时间的专用时间数字转换组件,使得一块 51.6mm 宽的插件可以处理 96 路漂移室信号等等。

电荷数字转换在用分立元件时,一个 34.4 mm 宽的插件只能装一路,而且线路复杂,调整费事。由于专用集成电路的发展,现在已可能在一块 17.2 mm 宽的插件里装 12 路,甚至 48 路转换,每一路的造价降低了几十倍,而且其他指标也大大提高了。

放大器采用专用混合集成电路以后,不但从每个插件装两路改进到可装 12 路,而且解决了较难解决的输出端直流电位由于环境温度变化而漂移的问题。由于集成工艺可以大大减小杂散电容还可以提高线路的速度,曾有人利用混合集成技术制成上升时间特短(0.4ns)的放大器。

其他如混合集成的甄别器、定标器……,多种多样。

国外从事高能电子学工作的人,化了很大的力量发展专用的集成电路,特别是混合集成电路。这方面的发展很快,而且其地位越来越重要。仪器的指标,特别是可靠性,很大程度上决定于这方面的进展。

(3) **仪器设备** 目前高能实验所用的快电子学线路其速度约在 1—2ns 左右,这就要求测验设备相应地发展,特别是作为其主要观测手段的高速示波器。我们知道示波器的频宽和上升时间有如下关系:

$$\text{上升时间} \approx 0.35/\text{频宽}$$

故一个 300MC 的示波器,其本身的上升时间就约 1.2 ns,与被测信号的速度相当时观测还可进行;若是 100 MC 的示波器,其本身的上升时间就有 3.5ns,也就无法使用了。取样示波器在使用时对同步等等的要求比

较严格,因此使用取样示波器并不能完全解决问题。

制造快示波器就需要快的示波管。法国 LEP 实验室曾研制出一种示波管,性能如下:

频带: 直流—5000 兆赫;

写速: 每秒 10^9 米,即每 ns 达 100cm。

垂直/偏转灵敏度: 每伏电压 7cm。

光点直径: ~ 0.4 mm。

在设计中除了通常的示波管技术外,还采用了象增强技术(通道倍增技术),降低了对电子束的能量和亮度的要求,得到更高的灵敏度和分辨率,这种类型的示波管和用它制造的示波器,在国外已经有了工业产品。

(4) **标准化问题** 实验规模这么大,为便于各种电子学仪器相互配接,并便于研制和生产,标准化是个很重要的问题。国际上已经发展了两个系列,一个是核电子学系列(NIM 系列),一个是 Camac 系列,都采取插件形式,在机箱设计、接插件,以及电气性能的互相配接方面,都作了详细的规定。我们自己的标准化工作怎么开展,是一个很重要的课题。

[注 1] 粒子到来的时间并不是均匀的,能在 100 MC 重复频率下工作的电子学仪器,一般能用到 10^7 次/秒的计数率。

(题头设计: 陈世铮)