

自猝灭流光管的电荷分配法定位

马金源 李佩琴 陆伟达 陆昌国
周月华 张羽 顾维新 崔象宗

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文报告了利用自猝灭流光信号进行电荷分配法定位的实验结果。实验显示,信号即使经过60米长电缆的传输进入ADC,对2.5米长的计数管来说,在中心处的位置分辨率仍可达3.3 mm,比利用正比信号得的结果要好得多,同时,定位的线性好于2.5米全长的0.14%。文中同时还讨论了ADC门宽以及高压隔直流电容 C 的选择等问题,为设计北京正负电子对撞机谱仪中簇射取样计数器的取样保持电路提供了对某些参量的实际要求。

一、引 言

在电阻性电极的探测器中,用电荷分配法来定出入射粒子沿着探测器轴向的位置是一种通用的技术。Radeka等人已经证明了如下电荷分配法的普遍公式^[1]

$$Q(a) = Q \cdot [R(l - x_0) + R_L] / (Rl + 2R_L),$$

$$Q(b) = Q \cdot [Rx_0 + R_L] / (Rl + 2R_L),$$

其中 $Q(a)$ 、 $Q(b)$ 分别表示从探测器 a 端和 b 端流出的总电荷量, l 为探测器轴向总长度, x_0 为电荷注入点与 a 端的距离, R 为电阻性电极的单位长度电阻值, R_L 为电极的终端阻抗, Q 为注入的总电荷量。由上式的推导可发现,电荷的最终分配与探测器的分布参量 L 、 C 无关,即使它们都是位置的函数, $Q(a)$ 和 $Q(b)$ 也还是服从上述简单的关系。

从原理上说,这种方法能将位置定得十分精确,直至探测器的本征定位精度。但实际上由于噪声的影响,使定位精度受到很大的限制^[2]。这种噪声包括电阻性电极丝的热噪声,放大器的噪声,以及整个探测器、电子学系统检拾到的环境的噪声和地回路的影响。MARK-III簇射计数器就是采用电荷分配法来作轴向定位的,他们给出的典型的噪声数值为^[3]:电极丝的热噪声及放大器噪声造成的总的等效噪声电荷为 $2.68 \times 10^{-15}C$ (库仑),环境检拾及地回路造成的等效噪声电荷为 $6 \times 10^{-15}C$ 。

如果采用正比放大的气体工作方式,其信号电荷量约为0.7pc,则可以预见其位置分辨率只能达到1%左右,亦即噪声信号比的水平。为了提高位置分辨率,必须增加信号电

荷量。盖革信号要比正比信号大两个数量级以上,但盖革放电将沿整根阳极丝进行,无法确定原始放电产生的位置,当然也可采用绝缘子之类的方法人为地使放电局限于 5mm 左右的空间,但这将大大地影响计数管的效率^[4]。一种更理想的方式就是自猝灭流光信号。根据对这种流光信号的直接光学摄影观察^[5],它的放电范围局限在 100—500 μm (沿阳极丝),而它的电荷量则比正比信号高 1—2 个数量级。

本文作者正在研究将 SQS 计数管应用于气体簇射取样计数器的可能性。本文报告我们利用 SQS 信号进行电荷分配定位的实验结果,并据此对设计中的取样保持电子学系统的某些参量提出实际的要求。

二、实验方法

(1) 实验装置

实验所用的自猝灭流光管是用内径为 18 mm,壁厚为 2 mm 的铝管制成,管长 2.5 米,在管壁上均匀地钻了 9 个直径为 1.2 mm 的小孔,孔上覆盖普通的薄膜胶纸以作为 Fe^{55} X 射线源的窗口,9 个小孔将全管分成 10 等分,每段长 25 cm。阳极丝为直径 47 μm 的不锈钢丝 (Stablohm 800)。所用气体为 50% Ar + 50% CO_2 通过 0°C 的二甲氧基甲烷,高压为 2900V。

测量系统的电子学框图如图 1 所示。

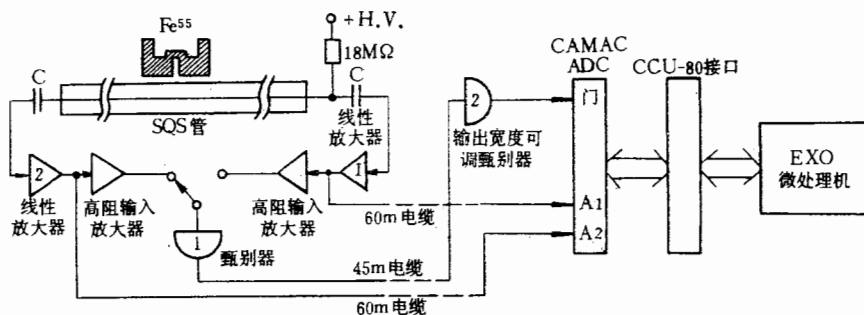


图 1 测量系统的框图

SQS 信号由隔直流电容 C 引出,经过放大倍数约为 7 倍的线性放大器后,由三通接头分为两路,一路接入输入阻抗为 5 k Ω 的放大器,将信号放大得足以触发甄别器,另一路接至 60 米长的 RG-213U 电缆,电缆穿过实验厅的走廊,通至楼上微处理机机房。为了保证能触发甄别器 1,当源放到管子的左半部分时,将甄别器输入端接至左边放大器,反之,接至右边放大器。甄别器输出的电缆长 45m,所以触发信号将比待测信号提前 75ns 到达。将甄别器 2 的输出宽度调至 350ns 左右送至 ADC 作为开门信号。

60 米长的电缆地回路的影响十分严重,为了抑制这种影响,我们将计数管端的所有装置包括计数管、放大器、甄别器等的地全部浮置起来,在 CAMAC 机箱端才接地,使这种影响减少到实验可接受的程度。

(2) 刻度方法

为了尽量减小刻度中可能会带来的系统误差, 我们对左右两路电子学系统同时进行刻度, 见图 2.

由 NE4674 标准信号产生器输出的负台阶信号接入电荷分路装置, 其输入端电阻为 50Ω , 电压电荷转换电容 C 经精密万用电桥测量其电容量为 101.9 pF , 两个 470Ω 电阻用数字式万用表测量其阻值相等, 这样就保证了输入到左右两路的刻度用的电荷量相等, 误差小于 0.1% . NE4674 的触发输出端输出一个提前 60 ns 的正信号, 该信号经倒相器接入 60 米长电缆, 直接送至 CAMAC ADC 门产生器. 电荷分路装置的总的时间常数为 26 ns , 比门宽 350 ns 小得多, 保证全部电荷量为 ADC 所接受.

两路放大器和 ADC 系统的刻度曲线如图 3 所示, 由图可见, 在 ADC 300 道以上, 线性十分好, 刻度点与拟合直线的标准偏差均为 1.6 道左右, 但在 300 道以下, 可明显看到偏离线性了, 为了消除这种非线性的影响, 对 300 道以下的刻度曲线用折线进行拟合. 在每次测量之前都进行仔细的刻度, 并将刻度数据记磁盘, 以备离线分析时用. 从几次刻度的结果来看相差甚微, 说明测量系统的性能是稳定的.

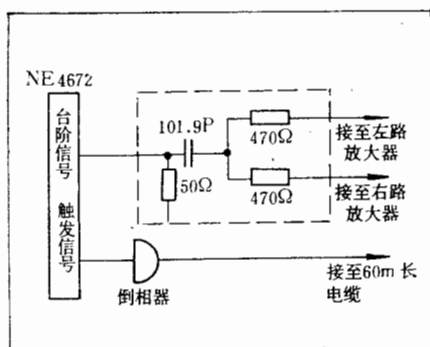


图 2 刻度方法示意图

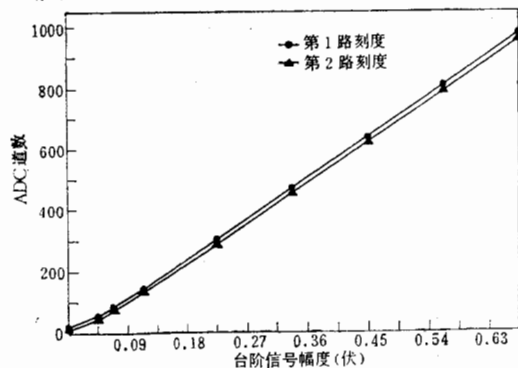


图 3 刻度曲线

(3) 噪声水平

随机触发使 ADC 开门, 同时记录下左右两路的台阶信号, 由此可得 $\sigma_1 = 0.045\text{ pc}$, $\sigma_2 = 0.0554\text{ pc}$. 噪声水平很高, 大部分噪声来自 60 米长的电缆对环境噪声的检拾. 为了解两路噪声的共模特性, 我们对同时记录下的两路台阶噪声信号计算了它们的相关系数, $C_r = 0.75$.

(4) 门宽的考虑

在注入电荷为 δ 函数的近似假设下, 由电极方程可解得电荷分配比与入射点位置 x 及时间 t 的关系式^[6]

$$\frac{Q_a(t, x)}{Q_a + Q_b} = 1 - \frac{x}{l} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{m\pi} \sin\left(\frac{m\pi x}{l}\right) \exp\left(-\frac{m^2\pi^2}{\tau_D} t\right),$$

其中 l 为计数管总长度, x 为人射点距 a 端的距离, 并假设计数管两端的终端阻抗为 0, $\tau_D = R_D C_D$, R_D , C_D 分别为计数管阳极丝总电阻和总分布电容.

为保证电荷分配比与位置关系的线性, 在上式的累加号下的值必须非常小, 也即收集电荷的时间 t 须足够长, 当 $t \geq \frac{1}{2} \tau_D$ 时, 非线性就小于 0.2%^[6], 若 $t \simeq \tau_D$, 则可认为电荷分配是本征线性的了. 在我们目前的实验条件下, $R_D = 2170 \Omega$, $C_D = 23.4 \text{ pf}$, $\tau_D = 51 \text{ ns}$, 所以 ADC 的门宽只需 51 ns 就足够了. 但以上的考虑都是对 δ 函数型注入电荷才成立. 今 SQS 信号本身的延续时间 $\sim 150 \text{ ns}$, 所以实际上我们取 ADC 门宽 350 ns.

三、实验结果

(1) 线性

我们知道, 计数管两端的信号要经过高压隔直流电容 C 才进入电子学测量系统, 由于 C 的存在也会影响到测量结果的非线性, 所以 C 的值不能取得太小, 为此我们分别在电容值为 25000 pf 和 10000 pf 的情况下进行了测量. 将位置 x (准直孔与 b 端的距离) 与相应的 $Q_a/(Q_a + Q_b)$ 的关系作于图 4, 在两种电容值下, 都得到了极好的线性关系, 用最小二乘法作线性回归分析显示, 两者的线性相关系数均达到 0.99999, 实验点与拟合直线之间的残余偏差的标准误差 σ 都为 0.36 cm, 即测量位置的线性达到 0.14%.

电容值不同会使 $Q_a/(Q_a + Q_b) \sim x$ 直线的斜率有所不同, 在图 5 中, $C = 25000 \text{ pf}$ 时斜率为 0.00367/cm, $C = 10000 \text{ pf}$ 时斜率为 0.00352/cm. 这一点也是很好理解的^[3].

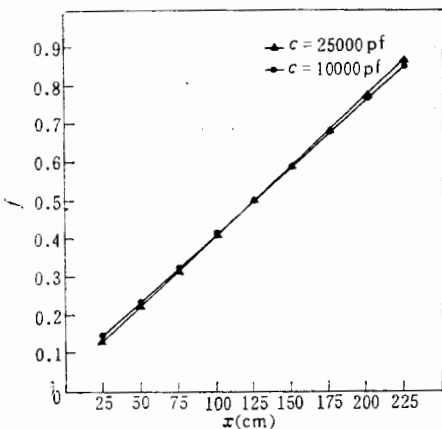


图 4 $Q_a/(Q_a + Q_b)$ 与 x 的线性关系

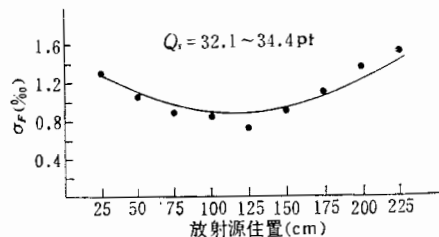


图 5 电荷分配比的误差

(2) 位置分辨率

由上述线性的测量可知入射粒子位置 x 与电荷分配比 $\frac{Q_a}{Q_a + Q_b}$ ($\equiv f$) 满足

$$x = k \cdot f + l,$$

其中斜率 k 和截距 l 均可由实验定出. 当 $C = 10000 \text{ pf}$ 时, 实验定出 k 为 284.1 cm. $C = 25000 \text{ pf}$ 时, k 为 272.5 cm, 于是

$$\sigma_x = K \cdot \sigma_f,$$

可见位置分辨率直接正比于电荷分配比的测量误差。根据误差传递的一般理论易知

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{Q_s^2} \{ (1-f)^2 \sigma_1^2 + f^2 \sigma_2^2 - 2f(1-f)c_s \sigma_1 \sigma_2 \},$$

其中 Q_s 为两端电荷量之和,

σ_1, σ_2 分别为测量 Q_a 和 Q_b 的误差,

c_s 为 a, b 两路误差的相关系数。

如果考虑到准直孔给定位带来的误差 $\sigma_{\text{准直}}$, 则实际得到的电荷分配比的误差 σ_F 应为

$$\sigma_F = \left\{ \sigma_f^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{准直}}}{K} \right)^2 \right\}^{1/2}.$$

我们将实验得到的 σ_F 和根据误差理论计算得到的曲线画于图 5, $\sigma_{\text{准直}}$ 取 2 mm, 图 中所取事例的电荷量为 32.1—34.4 pc. 实验点和理论估算符合得较满意. 由 σ_F 我们可以得到位置的误差, 对中心处 ($x = 125$ cm), $\sigma_x = 2.1$ mm, 对最右端的位置 ($x = 225$ cm), $\sigma_x = 4.3$ mm, 所以对 250 cm 长的计数管而言, 中心处的定位精度为 0.084%, 靠近端部处为 0.17%. 如果将整个 SQS 谱的事例全部合在一起加以处理, 则位置分辨率会变得稍差, 中心处为 0.13%, 端部处为 0.22%.

由 σ_f 的公式可知, $\sigma_f \propto 1/Q_s$, 即信号电荷量越大, σ_f 将越小, 这一点在图 6 中定性地得到了反映.

典型的 f 的分布见图 7, 这是放射源置于中心处 (125 cm) 测得的 f 分布, 图中横坐标的单位为 0.1%.

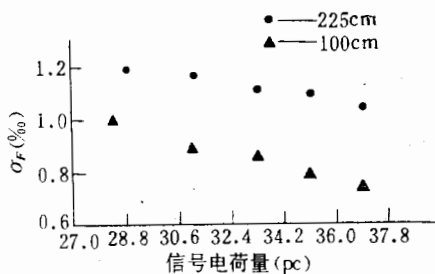


图 6 $\sigma_f \sim Q_s$ 的关系

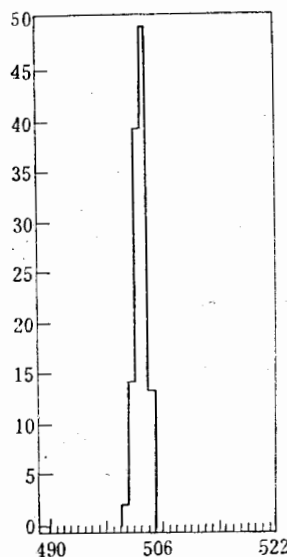


图 7 f 的分布

四、讨 论

我们的实验环境很不理想, 电缆很长, 计数管两端的引出部分 (包括高压隔直电容和 1.8M Ω 的电阻) 都没有采取任何屏蔽措施, 从台阶信号的测量结果来看, 噪声水平比 MARK-III 高出一个数量级 (因后者的模拟信号电缆比较短), 但最终的位置分辨率仍旧很好, 这完全是因为 SQS 的信号电荷量大的缘故. 如果我们缩短信号电缆的长度, 可以将

目前达到的分辨率进一步提高. M. Atac 等人用 SQS 信号在 2 米长计数管上进行电荷分配的结果显示,在中心处的位置分辨率可达 1 mm 左右^[7].

本实验中的电荷收集时间为 ~ 300 ns,考虑到今后在簇射计数器中采用的 SQS 管的横向尺寸最大将有 3.5 cm,选择合适气体使漂移速度为 5 cm/ μ s,则从最边缘处漂移至阳极丝的时间将为 350 ns,所以如果取 ADC 开门宽度为 650 ns 以上完全能满足线性的要求.

因为 SQS 信号电荷量大,毋须前置放大器,这就可以大大降低电子学系统的制造成本,如果 SQS 信号电荷量选择为 30 pc 的话,则整个取样保持电路的电荷增益可取为 2^[3].

五、后 记

实验中所用的 ADC 插件与放大器分别由本所电子学室屈运河和高翠山同志制作,由于这些插件性能良好,工作稳定,保证了实验的顺利进行. 本所飞行时间组及钟戈平同志热情地借予电子学插件,谨此致谢.

本工作得到叶铭汉先生的关心,并蒙审阅本文原稿,作者表示深切的谢意.

参 考 文 献

- [1] V. Radeka and P. Rehak, BNL 25070, Oct. 1978
- [2] J. L. Alberi and V. Radeka, *IEEE NS-23*(1976), 25.
- [3] D. Bernstein and D. Hutchinson, *IEEE NS-29*, No. 1(1982), 294.
- [4] PEP-4 TPC Collaboration, *IEEE NS-30*, No. 1(1983), 117.
- [5] 陆昌国,高能物理与核物理, **7**(1983), 643.
- [6] V. Radeka, *IEEE NS-21*, No. 1(1974), 51.
- [7] M. Atac and F. Bedeschi, *IEEE NS-29* (1982), 396.

POSITION SENSING BY CHARGE DIVISION METHOD IN SELF-QUENCHING STREAMER TUBE

MA JIN-YUAN LI PEI-QIN LU WEI-DA LU CHANG-GUO
CHOU YUE-HUA ZHANG YU GU WEI-XIN CUI XIANG-ZONG
(*Institute of High Energy Physics Academia Sinica*)

ABSTRACT

The experimental results of charge division method with the self-quenching streamer pulses are reported. It is shown that the position resolution at the middle point of 2.5 m long tube can reach 3.3 mm even the signals are sent to ADC module by 60 m long cable. It is much better than using the proportional pulses, and the non-linearity is less than 0.14% of 2.5 m full scale. Some other aspects, such as ADC gate width and selecting of the decoupling capacitor etc. are also discussed, they would provide some practical basis for the design of the sample and hold system in the gas sampling shower counter of the Beijing e^+e^- collider spectrometer.