

电荷灵敏前置放大器

张轩，复旦大学核科学与技术系

摘要：本实验测量了电荷灵敏前置放大器的电荷变换增益、噪声以及噪声斜率。

关键词：前置放大器 噪声

一、引言

核辐射是由同位素放射源、加速器、反应堆等辐射源产生的。为了探测核辐射，探测器通常需要紧靠辐射源。而辐射源所在处通常具有很强的辐射，人员不适合在现场工作，安放探测器的场所可能空间狭窄、环境恶劣（如反应堆中），不适合放置大体积的测量仪器。因此探测器输出信号往往要通过长长的同轴电缆传输到后面的信号处理单元。核辐射探测器输出信号的幅度一般较小，多在 mV 量级。因此，需要先经过放大再进行处理和测量。放大通常分为预放大（由前置放大器完成）和主放大（由主放大器完成）。本实验测量了前置放大器的电荷变换增益及其噪声，进一步了解了前置放大器的工作原理和主要性能。

二、实验目的

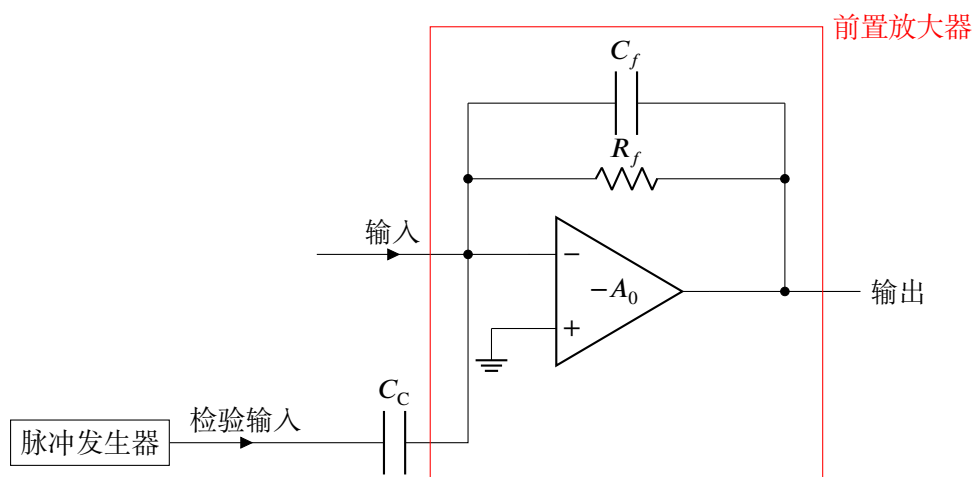
1. 了解电荷灵敏前置放大器的工作原理；
2. 学会测量电荷灵敏前置放大器的主要技术指标的办法。

三、实验原理

3.1 电荷变换增益

图1是测量电荷灵敏前置放大器的电荷变换增益的原理图。 C_C 是检验电容， C_f 是反馈电容， R_f 是反馈电阻。由于电荷灵敏前放的输入电容远大于检验电容，可以认为检验端注入的电荷量是 $Q_I = U_I C_C$ 。电荷变换增益是前置放大器将电荷转化为衰减信号的幅度的能力，其表达式为

$$A_C = \frac{U_O}{Q_I} = \frac{U_O}{U_I C_I} \quad (1)$$



3.2 噪声

噪声是电荷灵敏前置放大器的一项主要指标，它有两项内容：一项是零电容噪声，它表示放大器的固有噪声，即不带探测器、不外加电容时的噪声；另一部分是噪声斜率，它定义为放大器输入端对地每增加单位电容时噪声增加的噪声，这一项是用来估计接上探测器后，探测器电容对噪声的影响。在实际测量中，前置放大器的电子学噪声常用能量半宽度 FWHM 来表示。一个实际的电荷灵敏前置放大器为例，其噪声特性为式(2)（在成型时间常数为 $3\mu\text{s}$ 时的测量结果）：

$$\text{FWHM (GeV)} = 1 \text{ keV} + 0.03 \text{ keV/pF} \times C \quad (2)$$

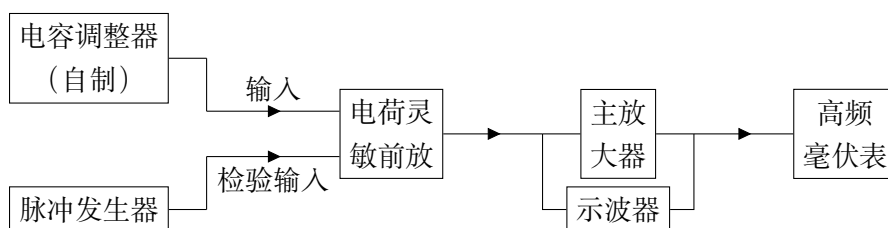


图2 噪声测量电路

电荷灵敏前置放大器的电路图如图2。电荷灵敏前放的检验输入阶跃电压为 U_I （实际输入足够宽的矩形脉冲或衰减时间足够长的指数衰减脉冲），故注入的电荷量为 $U_I C_C$ ；前放输出信号幅度为 U_O ；主放输出信号幅度为 U_{O2} ：用高频毫伏表测出主放输出端噪声电压值为 U_{n2} ，故前放输出端噪声电压值为 $U_{n1} = \frac{U_{n2}}{A}$ ，其中 A 是主放大器的放大倍数。

高频毫伏表测量的是电压的方均根，以电压为单位的噪声线宽为

$$\text{FWHM}_U = 2.36 \times U_{n1}$$

我们用下面两式将其转化为以能量为单位读噪声线宽：

$$\frac{\text{FWHM}_U}{\text{FWHM}_Q} = A_C = \frac{U_{O1}}{U_I C_C}$$

$$\text{FWHM}_E = \frac{\text{FWHM}_q \bar{w}}{e}$$

其中 e 是电子电荷量， \bar{w} 探测器的平均电离能，我们去硅探测器的平均电离能，于是

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\bar{w} = 3.6 \text{ eV}$$

最终可得

$$\text{FWHM}_E = \left(2.36 \times \frac{\bar{w}}{e A_C A} \right) U_{n2} = 0.165 \frac{U_{n2}}{\text{mV}} \quad (3)$$

四、实验装置

1. MSO2202 数字示波器 1 台
2. CAKE151 型电荷前放 1 台
3. DG4102 脉冲发生器 1 台
4. CAKE611 型放大器 1 台
5. SP2217 超高频毫伏表 1 台
6. 自制电容调整器 1 个

五、实验过程

5.1 测量电荷变换增益

本实验采用的 CAKE151 型电荷前放，其参数为 $R_f = 5.0 \times 10^8 \Omega$, $C_f = 1 \text{ pF}$, $C_c = 1 \text{ pF}$ ，最大输出为 7 V 。

按照图1连接电路，设置检验输入是周期为 100 Hz 的方波信号。用示波器测出 U_I , U_O 和衰减时间 τ ，计算出 A_C 的值。

5.2 测量噪声和噪声斜率

1. 判断主放大器是否正常工作，测量放大倍数 A

按图连接线路，断开电容调整器和高频毫伏表，正确合适的输入信号参数（极性宽度、周期、幅度等，自选）和放大器工作条件（放大倍数 500 倍左右、成形时间常

数为 $3\mu\text{s}$), 自前放检验端输入信号 U_I 用示波器测量前放输出幅度 U_{O1} 和主放输出幅度 U_{O2} , 并根据波形分析各部分工作是否正常, 计算主放大器的放大倍数 A 。

2. 测量噪声和噪声斜率

断开脉冲发生器, 在前放输入端接入电容调整器, 在外接电容为 C 为

0, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 250, 300 pF

时, 用高频毫伏表测量 U_{n2} 。

六、实验结果和分析¹

6.1 电荷变换增益

在电荷灵敏前置放大器输出端, 用示波器的测量功能测量的结果如表1所示

表 1 电荷灵敏前放的测量结果

测量参数	测量结果
输出幅度 U_O	1.980 V, 2.060 V
上升时间	4.010 ms
下降时间	4.010 ms

表1中输出幅度是测量方波上升沿和下降沿各自测量的一次的结果。我们取它们的平均值来完成后续计算。

$$U_O = \frac{1.980 + 2.060}{2} \text{ V} = 2.02 \text{ V}$$

考虑到电荷灵敏前置放大器的输入阻抗为 50Ω , 故实际分到其上的电压为设定值的一半, 即 $U_I = 2 \text{ V}$, 故电荷变换增益为

$$A_C = \frac{U_O}{U_I C_I} = \frac{2.02 \text{ V}}{2.000 \text{ V} \times 1 \text{ pF}} = 1.01 \text{ pF}^{-1} \quad (4)$$

信号的时间常数为

$$\tau = \frac{t_f}{\ln 9} = 1.825 \text{ ms} \quad (5)$$

6.2 噪声

在设定主放大器的放大倍数为 400 倍左右时, 用示波器测量输入电压为 4.4 mV 输出电压为 1.4 V 。故放大倍数为

$$A = \frac{U_{O2}}{U_{O1}} = \frac{1.4 \text{ V}}{4.4 \text{ mV}} = 318 \quad (6)$$

¹由于当时实验时间有限, 主放大器无法调整到近 500 倍放大的正常工作状态, 有一些重要的结果未能测量。另外实验前半部分的波形数据意外丢失, 只剩下数据记录本所记部分。本实验可能需要一次补充实验。

将直接测量的噪声数值按照式(3)转化为能量的半高全宽。做线性拟合,结果如图3和表2所示。

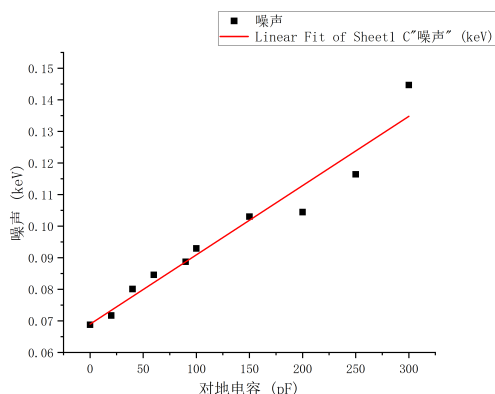


表 2 噪声以及噪声斜率的拟合结果

拟合方程	FWHM = $b + kC$
b(keV)	0.069 ± 0.003
k(keV/pF)	$(21.9 \pm 0.2) \times 10^{-5}$

图 3 噪声以及噪声斜率的测量

该电荷灵敏前置放大器的零电容噪声和噪声斜率分别为 0.069 ± 0.003 keV 和 $(21.9 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ keV/pF。

七、实验结论

- 通过直接测量输出电压幅度,测量了 CAKE151 型电荷灵敏前放的电荷变换增益是 1.01 pF^{-1}
- 通过波器测量上升和下降时间,测量了 CAKE151 型电荷灵敏前放输出的时间常数为 1.825 ms
- 通过高频毫伏表测量主放大器的输出以及相关公式,测量了 CAKE151 型电荷灵敏前放的零电容噪声和噪声斜率,分别为 0.069 ± 0.003 keV 和 $(21.9 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ keV/pF

八、实验讨论

- 本次实验过程中,发现自己的噪声处理能力不到位,对于本次实验中难以频闭的 50 Hz 噪声,完全可以后期在数据处理时,使用傅里叶变换处理掉这部分噪声。
- 实验测得的前放输出端的时间常数和理论值 $\tau = R_f C_r = 0.5 \text{ ms}$ 相差很大,找不出是何原因。
- 本次实验应当测量前放的输入阻抗,或者利用双公头直通直接测量电路图中前置放大器输入端的电压值。由于时间和经验的不足,没有测量改值,而是直接认为输入阻抗是 50Ω 。
- 高频毫伏表的数据不稳定,波动较大,应当等间隔记录多次取平均。

-
- 关于零电容噪声和噪声斜率的测量结果的可信度和重复性有待进一步提高。