



普通高等教育“十三五”规划教材

核电子学实验

周 荣 王忠海 编著



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

核电子学实验

周 荣 王忠海 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是为了适应我国核电与核技术应用迅猛发展的良好势头,结合四川大学多年核电子学实验课程教学经验而编写的最新核电子学实验教材。全书共12个实验,前9个实验为基础实验,后3个实验为开放实验。附录部分总结了实验中容易遇到的问题、实验中需要用到的课外知识以及实验所用电路的完整电路原理图。

本书可作为高等院校核专业本科生的核电子学实验教材,也可作为核专业研究院校核电子学人才培养的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

核电子学实验/周荣,王忠海编著. —北京:科学出版社,2016.8
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-03-049103-9

I. ①核… II. ①周… ②王… III. ①核电子学—实验—高等学校—教学参考资料 IV. ①O571.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第142252号

责任编辑:昌盛 罗吉 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:张伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717
<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第一版 开本:720×1 000 B5

2016年8月第一次印刷 印张:6 1/2

字数:131 000

定价:24.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自从人类开始发展和利用核科技以来，核科学与技术就与国家安全息息相关。随着民用核技术的兴起，核技术逐渐发展成为一个重要的高新技术领域，在工农业生产、医疗、公共安全、检验检疫、大科学与工程等方面得到了极为广泛的应用。

我国的核事业从零起步，在中苏论战及冷战时期取得了辉煌的成就，成功研制了原子弹、氢弹和核潜艇，建立了完整的核工业体系。在经历了改革开放初期和冷战结束后短暂的低谷期后，随着国家在能源、国防、环境、医疗卫生以及基础科学研究等方面的大力投入，我国的核事业迅速迎来了第二次大力发展时期。

核事业的迅速发展对核专业人才的培养规模和质量提出了新的需求，国内高校纷纷重建或扩建核专业。据教育部高等学校核工程类教学指导委员会统计，目前我国大陆地区开设有核专业的高校已有 46 家，加上军队院校，总数已经超过 50 家。

作为工程类专业，实验教学是不可或缺的关键环节。尤其是“互联网+教育”的模式下慕课的兴起，更是突出了实验教学在高校教育功能中的重要地位。令人遗憾的是，目前国内普遍缺乏适用于核专业教育新形势下的实验教材及实验仪器。四川大学作为国家最早开设核专业的高校之一，近 60 年来一直重视实验课程建设工作，积累了较为丰富的实验课程建设及实验教学经验。针对国内核专业大力发展的需求，在学校和各兄弟院校的支持下，以核电子学实验为突破口，潜心开发了专门用于教学实验的仪器设备，编写了相关实验教材。经过 4 年多在四川大学及其他兄弟高校的试用，取得了不错的效果。因此，我们经过努力促成了这一教材的正式出版，希望能够惠及更多高校。

本书的内容主要分为三个部分：基础实验、综合实验和附录。其中基础实验包含了九个章节的实验内容。实验零为准备实验，主要让学生复习如何使用任意信号发生器和示波器；实验一到实验八分别对应核电子学电路的八个主要功能单元，训练学生掌握最基本的核电子学电路单元。综合实验包含三个章节的实验内容（符合测量系统搭建实验，时间测量系统搭建实验和能谱测量系统搭建实验），分别对应核电子学中三种常用的测量系统，培养学生站在系统的高度来认识核电子学的能力。附录包含实验用到的测试信号介绍，任意信号发生器和示波器使用中常见问题列表，摘录的参考知识点，以及所有实验模块的完整电路原理图。

本书在编写时主要有以下几点创新：①设计了实验准备内容，让学生在充分准备的前提下才能开展动手实验，提高学生的实验成效；②实验内容的前两题为测试信号和电路初始化，限定了学生实验中所使用的测试信号，通过电路初始化，可以

让学生实验的起点相同，同时可以判断实验设备是否处于正常的工作状态，避免因仪器设备的问题耽误实验时间；③实验内容中设计了选做实验题目，为有兴趣的同学提供了更多的锻炼机会；④附录中设计了任意信号发生器和示波器使用中的常见问题，让学生在遇到问题时可以参考附录自主解决问题，同时可以节约老师的时间；⑤设计了统一的实验准备报告模板，原始数据记录单模板和实验报告模板，可以方便学生完成实验报告，并且可以统一报告格式，方便老师评阅。总而言之，本书在编写时总结了四川大学核电子学实验室多年教学的经验，这些经验很好地解决了目前各大高校普遍存在的学生多、老师少的问题；同时也很好地解决了新开设核电子学实验课程的高校师资和教学经验都相对较为缺乏的问题。

四川大学核工程与核技术实验室在本教材编写和试用期间，得到了第二炮兵工程大学、清华大学、吉林大学、西南大学、重庆大学、国防科技大学等兄弟高校宝贵的反馈意见，在此向他们深表谢意。

教育部高等学校核工程类教学指导委员会对本教材的出版和四川大学核专业实验教学给予了大力的关注和支持，在此向核专业教指委表示感谢。

本教材内容的编排和修订得到了四川大学核专业研究生和本科生张京隆、杨光、张驰、刘寅宇、王玉东、董春辉、刘怡文、胡兵、陈丰、姚玉华、熊浩、张湘、杨锋、周健欣、何劲风、吴科伟、张乐瑞、刘宝坤、王柏桦、李俊龙等同学的大力参与，一并向他们表示感谢。

由于时间和水平有限，本书不妥之处在所难免，欢迎读者随时批评指正。

编者

2016年5月于成都

目 录

前言	
实验零 任意信号发生器与示波器的使用	1
实验一 电荷灵敏前置放大器	6
实验二 主放大器	11
实验三 单道脉冲幅度分析器	17
实验四 堆积判弃电路	23
实验五 多道脉冲幅度分析器	28
实验六 时间检出(前沿/过零)	34
实验七 符合反符合实验	41
实验八 定标器实验	46
实验九 符合测量系统设计实验	51
实验十 时间测量系统设计实验	53
实验十一 能谱测量系统设计实验	55
参考文献	57
附录一 测试信号	58
附录二 信号发生器和示波器使用中常见问题	60
附录三 非线性及其测量	62
附录四 耦合	64
附录五 单稳态触发器	66
附录六 D 触发器	68
附录七 TDC-GP2 芯片简介	70
附录八 SR 锁存器	72



附录九	电荷灵敏度	73
附录十	前置放大器实验模块原理图	75
附录十一	主放大器实验模块原理图	76
附录十二	单道实验模块原理图	77
附录十三	多道实验模块原理图	78
附录十四	过零定时实验模块原理图	81
附录十五	时数转换实验模块原理图	83
附录十六	定标器实验模块原理图	87
附录十七	符合反符合实验模块原理图	91
附录十八	堆积判弃实验模块原理图	92
附录十九	数据传输实验模块原理图	93
附录二十	常用符号中英文对照表	98

任意信号发生器与示波器的使用

实验目的

- (1) 了解任意信号发生器和示波器的工作原理。
- (2) 掌握任意信号发生器和示波器的基本功能与调节技巧。
- (3) 了解任意信号发生器和示波器使用中的常见问题。

实验准备

(1) 以下给出了任意信号发生器输出一个特定信号所需要的基本操作，请给出你认为正确的操作顺序，并说明你的理由。

- a. 选择需要输出的信号波形。
- b. 设置信号波形参数。
- c. 选择输出通道。
- d. 打开通道的输出开关。

(2) 请问要使得任意信号发生器输出正确的信号波形，需要设置的信号波形参数有哪些？

(3) 以下给出了用示波器观测信号所需要的基本操作，请给出你认为正确的操作步骤，并说明你的理由。

- a. 选择观测通道，打开通道开关。
- b. 设置垂直幅度轴单位。
- c. 设置水平时间轴单位。
- d. 设置通道参数。

e. 设置触发模式和触发阈值。

(4) 请问示波器的带宽、采样率和有效位数分别指的是什么？有什么意义？

三、实验原理

3.1 任意信号发生器

任意信号发生器主要由外部端口、存储器、FPGA、DAC 和信号调制电路组成，其简化结构框图如图 0-1 所示。

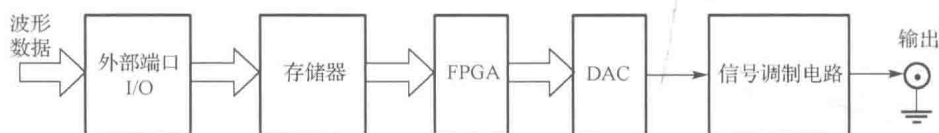


图 0-1 任意信号发生器结构框图

外部端口：通常包括 RS232、USB 和网口等。波形数据以通过外部端口传输到任意信号发生器内部存储器中。

存储器：主要用于存储从外部输入的波形数据，以及任意信号发生器厂商内置的多种基本波形的数据。

FPGA：是任意信号发生器的控制器。它通过用户的操作指令从存储器中读取相应的波形数据。然后调节信号的频率、相位和延时等参数。最后将调整后的波形数据发送给 DAC。

DAC：将波形数据转换成模拟信号。

信号调制电路：由于 DAC 输出的模拟信号存在一些缺点，例如，信号较窄时，信号不够平滑等。信号调制电路根据用户的操作指令对 DAC 输出信号的幅度进行缩放。另外信号调制电路还有一定的滤波作用，可以使信号变得更加平滑。

3.2 示波器

示波器主要由信号调制电路、ADC、触发电路、FPGA、存储器和显示器组成。其结构框图如图 0-2 所示。

信号调制电路：主要对输入信号的幅度进行缩放，以满足 ADC 的输入动态范围。并且对输入信号进行低通滤波，这也是示波器的一个重要参数（带宽）。

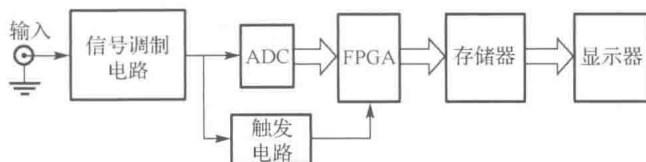


图 0-2 示波器结构框图

ADC: 将输入的模拟信号转换成数字信号。ADC 的采样频率和有效位数都是示波器的重要参数。

触发电路: 根据用户的设置挑选出用户感兴趣的信号波形, 并通知 FPGA。

FPGA: 根据触发结果, 从 ADC 输出的波形数据中挑选出用户感兴趣的波形数据, 并将其发送到存储器中。

存储器: 存储信号波形数据。

显示器: 从存储器中读取信号波形数据, 并将其显示出来。

四、实验装置

- (1) DS1204B 示波器一台。
- (2) DG4072 任意信号发生器一台。

五、注意事项

该部分的实验内容针对普源 (RIGOL) 公司生产的 DG4072 任意信号发生器和 DS1204B 示波器所设计^[1]。实验的主要内容是训练学生使用任意信号发生器产生后面章节实验课程中需要用到的两种信号波形和使用示波器观测信号波形。因为不同厂商和不同型号的仪器调节的方法和需要设置的参数可能有所不同, 所以如果使用其他型号的任意信号发生器和示波器, 请根据实际使用仪器修改以下实验内容后再开始实验。

六、实验内容

- (1) 输出方波信号。使用信号发生器产生频率 100 kHz、低电平 0 mV、高电平 100 mV, 占空比为 20%, 脉冲周期为 10 ms 的 Square 波, 请按以下步骤操作生成该方波信号。


- 打开任意信号发生器电源后，按下 CH1 键。
- 按下 Square 键。
- 在键盘上输入 100，按下 kHz 单位键。
- 点击“幅度/高电平”按键，选中高电平，在键盘上输入 100，按下 mV 单位键。
- 点击“偏移/低电平”键，选中低电平，输入 0，按下 mV 单位键。
- 单击占空比键，输入 20，按下%单位键。
- 按下 Burst 键，选择脉冲周期，将其设置为 10 ms。
- 单击 Output1 键，使 Output1 键高亮。

将任意信号发生器输出信号通过同轴电缆输入示波器的 CH2 通道。请按以下步骤操作示波器：

- 打开电源，按下 CH2 按键，使其高亮。设置屏幕左边的菜单栏，使其中的每一个选项与以下表格一致，关闭菜单栏。

耦合	带宽限制	探头	挡位调节	反向	单位
直流	关闭	×1	粗调	关闭	V

- 按下 Run/Stop 键，使其为绿色点亮。
- 旋动 CH2 垂直标尺旋钮，使显示屏上的每个垂直格子所代表的幅度为 50 mV。
- 旋动水平标尺按钮，使屏幕上每一个水平方格代表的时间宽度为 1 μ s。
- 点击 TRIGGER 菜单的 MENU 键，将屏幕右侧的菜单栏设置到与以下表格一致，关闭菜单栏。

触发模式	信源选择	边沿类型	触发模式
边沿触发	CH2		自动

- 按下 MODE 键，选择到 normal 点亮。
- 旋动 LEVEL，使触发阈值为 50 mV。
- 按下 storage 键，将屏幕右侧的菜单栏设置到与以下表格一致。

存储类型	参数保存
PNG 存储	打开

插上 U 盘，点击外部存储→新建文件→保存。请在原始数据单中画出示波器屏幕中的信号波形，在实验报告中粘贴保存的 PNG 图像。

(2) 示波器参数设置。

- 调节 CH2 幅度标尺旋钮，使每一个垂直方格代表 100 mV。调节水平标尺旋钮，使每一个水平方格代表 2 μ s。保存此时的信号波形图。



b. 按下 CH2 按键, 将显示屏右侧的菜单栏中的耦合方式设置为交流, 保存信号波形图.

c. 将探头选项设置为 $\times 10$, 保存信号波形图, 并查看显示屏上的参数变化.

(3) 请按照实验内容(1), 使用任意信号发生器的 CH1 通道输出频率为 1 MHz, 低电平为 0 V, 高电平为 1.5 V, 脉冲周期为 10 ms 的 Gauss 波形, 并用示波器的 CH1 对该信号进行观测, 保存信号波形图.

提示: Gauss 波形的产生步骤为 Arb \rightarrow 菜单翻页 \rightarrow 选择波形 \rightarrow 内建波形 \rightarrow 数学 \rightarrow Gauss \rightarrow 选择. 再按下 Arb, 设置波形参数. 请自行设置示波器垂直标尺和水平标尺.

(4) 产生两个相对延迟为 500 ns 的 Gauss 信号. 请按照以下步骤进行操作:

a. 以实验内容(3)的输出信号为基础, 按下 CH1 \rightleftharpoons CH2, 并按下 Output2, 使其处于高亮状态, CH2 输出信号.

b. 用示波器的 CH2 通道观测任意信号发生器 CH2 通道输出信号, 测量信号的幅度, 保存信号波形.

请查看示波器 CH2 的参数设置, 找出信号幅度大于 1.5 V 的原因, 并将参数设置正确, 保存信号波形.

c. 将任意信号发生器的 CH1 和 CH2 分别与示波器 CH1 和 CH2 相连, 用示波器同时观察两个信号通道.

d. 单击任意信号发生器 CH1 按钮使其高亮, 单击 Arb, 单击菜单栏中的同相位, 使两个信号重合. 然后单击 CH2 按钮使其高亮, 单击 Burst 按键, 使其处于高亮状态, 在菜单栏中下翻页找到延时选项, 根据设置延时时间 500 ns, 保存波形图像.

七、思考题

(1) 查找资料简述三种耦合方式(直流、交流和接地)的工作原理, 理解三种耦合方式下示波器显示波形不同的原因.

(2) 请问示波器的主要触发模式有几种? 它们之间的区别是什么?

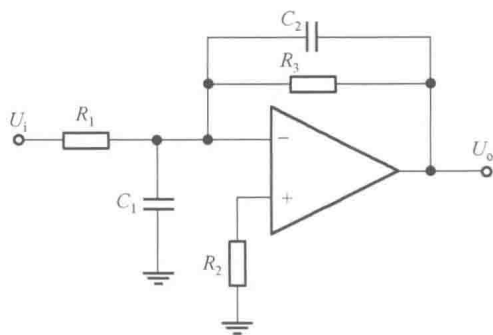
电荷灵敏前置放大器

一、实验目的

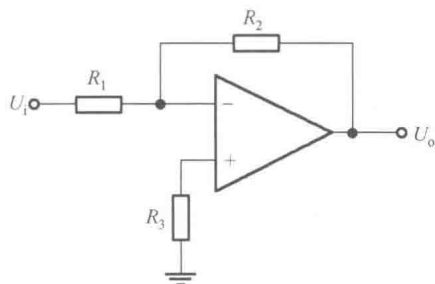
- (1) 掌握电荷灵敏前置放大器的功能。
- (2) 掌握电荷灵敏前置放大器的工作原理。
- (3) 了解电荷灵敏前置放大器的性能指标。

二、实验准备

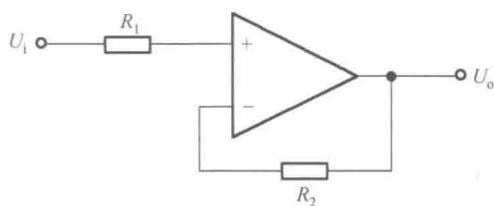
- (1) 为什么半导体探测器输出端需要连接电荷灵敏前置放大器？
- (2) 给出以下放大器电路的输出电压 U_o 与输入电压 U_i 之间的关系（输入信号为方波，脉宽为 t ，且 R_3 非常大）。



放大器电路 I



放大器电路 II



放大器电路 III

(3) 什么是电荷灵敏度?

三、实验原理

前置放大器实验模块主要由 3 级放大器电路组成,其结构框图如图 1-1 所示,简化电路原理图如图 1-2 所示.前置放大器实验模块的完整电路原理图请参考附录十.

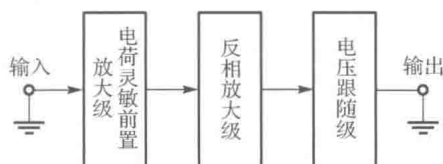


图 1-1 前置放大器实验模块结构框图

实验中采用任意信号发生器输出方波信号来模拟半导体探测器的输出信号,接入前置放大器实验模块的 IN 端口.但是半导体探测器输出信号为电荷信号(电流),而任意信号发生器输出为电压信号.所以电压信号在进入电荷灵敏放大级之前,先经过一个 $100\text{ k}\Omega$ 的电阻转换为电荷信号(电流).那么进入电荷灵敏放大级的电荷总量 Q 可以通过电压信号的脉宽、幅度和 $100\text{ k}\Omega$ 转换电阻计算得到.

在电荷灵敏前置放大级之前,电荷信号先经过一组电容 $C_1 \sim C_4$.实验中通过 SW_1 可以选择接入电容的容值来模拟半导体探测器结电容的变化.

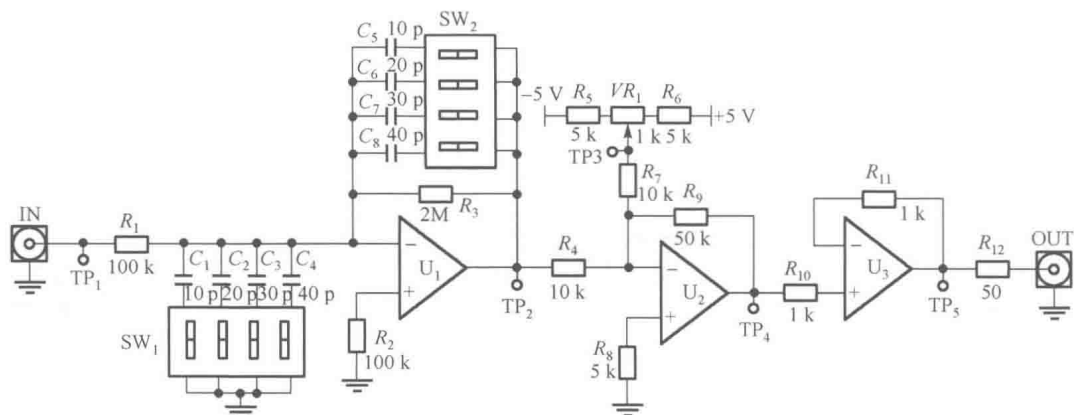


图 1-2 前置放大器实验模块简化电路原理图

第一级为电荷灵敏前置放大级，是由具有低噪声性能的结型场效应管作为输入级的高速运算放大器，在反馈回路中接入放电电阻 R_3 ($2\text{ M}\Omega$) 和积分电容 $C_5\sim C_8$ ($10\sim 40\text{ pF}$)。根据电荷灵敏放大器的工作原理，电荷灵敏前置放大级的输出为负脉冲电压信号。信号幅度为 Q/C_f ， Q 为输入电荷总量， C_f 为接入的反馈积分电容 $C_5\sim C_8$ 。

第二级为增益为 -5 的反相放大级。第一级输出的负脉冲电压信号经过第二级后变为正脉冲，并且幅度增大为原来的 5 倍。增大输出信号幅度，提高信号的抗干扰能力。

第三级是增益为 1 的同向电压跟随级，以增强电路的带负载能力。

四、实验装置

- (1) 母板实验箱一台。
- (2) 前置放大器实验模块一块。
- (3) DS1204B 示波器一台。
- (4) DG4072 任意信号发生器一台。

五、注意事项

- (1) 电路工作时，实验模块不可带电插拔，实验结束后必须断开电源。
- (2) 使用探头时轻拿轻放，不得将探头放置于接电的实验箱之上。
- (3) 实验中要求记录波形的操作中均需以 PNG 格式存储示波器波形图，要求在



原始数据记录单上记录相关波形, 注意标注横轴纵轴的单位, 并由实验指导老师检查签字。

六、实验内容

1. 测试信号

使用信号发生器产生 Square 波, 信号频率 100 kHz, 低电平为 0 mV, 高电平为 100 mV, 占空比为 20%, 将脉冲周期设置为 10 ms. 记录并保存波形, 实验中根据提示修改测试信号的各项参数, 测试信号波形如图 1-3 所示。

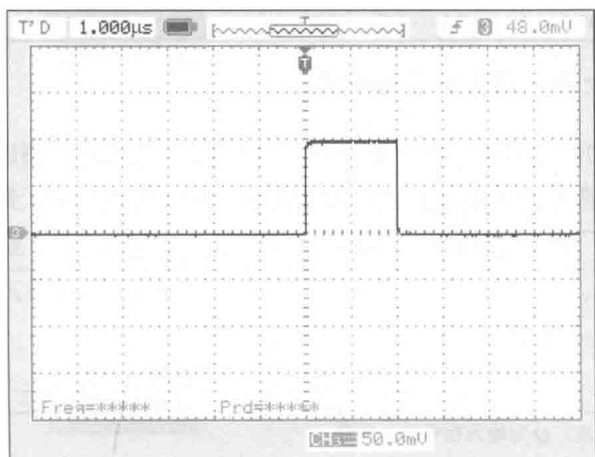


图 1-3 测试信号 Square 波

2. 电路初始化

将测试信号接入前置放大器实验模块输入端 IN, 分别打开拨码开关 SW_1 的第一位 (10 pF) 和拨码开关 SW_2 的第一位 (10 pF), 用示波器观测并记录输出端 OUT 的输出信号波形, 调节 VR_1 , 使得输出信号基线为 0 mV.

3. 电路认识

在电路初始化的基础上, 测量并记录 TP_1 , TP_2 , TP_4 , TP_5 的输出信号幅度, 完成以下两个表格 (保留三位有效数字)。

测试点	TP_1	TP_2	TP_4	TP_5
信号幅度/mV				

电路放大级	电荷灵敏放大级	反相放大级	电压跟随级
实际放大倍数			
理论放大倍数			
功能描述			

4. 结电容对输出信号的影响

依次打开 SW_1 的四位开关，在电路中模拟加入不同的结电容，观测并记录电路输出信号波形和幅度的变化，完成下表（保留三位有效数字）。

结电容/pF	输出信号幅度/mV
10.0	
20.0	
30.0	
40.0	

5. 前置放大器电荷灵敏度的测量

依次打开 SW_2 的四位开关，在电路中接入不同的反馈电容，测出电荷灵敏前置放大级的电荷灵敏度（参考附录九），并与理论值进行比较，完成下表（保留三位有效数字）。

反馈电容 C_f /pF	理论电荷灵敏度 $(1/C_f)$ /pF ⁻¹	实际电荷灵敏度 (U/Q) /pF ⁻¹	相对偏差
10.0			
20.0			
30.0			
40.0			

注：U 为 TP₂ 处信号幅度，Q 为输入信号的电荷量

6. (选做) 前置放大器积分非线性测量

理想的电荷灵敏前置放大器，当 C_f 固定时，其电荷灵敏度在一定范围内是一个常数。在该前置放大器电路中，第一级电荷灵敏前置放大级的输出信号幅度与输入电荷量的关系在直角坐标系中是一条通过原点的直线。由图 1-2 可知，由于后续两级电路均为线性电路，所以整个电路的输入信号与输出信号理论上呈线性关系。请测量前置放大器的积分非线性（请参考附录三）。

七、思考题

- 电荷灵敏前置放大器输出信号的上升时间和下降时间分别与什么有关系？
- 请问电荷灵敏前置放大器电路中的反馈电阻的作用是什么？