

# 快响应低漂移微电流放大器的设计与制造

彭宵微<sup>1</sup>, 何绍群<sup>2</sup>, 付国恩<sup>2</sup>

(1. 南华大学, 湖南 衡阳 421001; 2. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041)

**摘要:**介绍了基于 AD549 高精度快响应低漂移微电流放大器的工作原理、电路设计和制造工艺、调试技术; 该微电流放大器是核反应堆反应性测量的关键部件之一, 其低噪声、快响应与低漂移技术是精确测量反应性重要因素之一。

**关键词:**AD549; 微电流放大器; 设计

**中图分类号:** TL821 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2009)01-0223-04

在反应堆物理试验中, 需采用快速落棒法精确测量控制棒的积分价值与堆芯的停堆深度, 快速落棒导致堆芯中子注量率发生快速变化, 因此需要一种微电流测量范围在  $1 \times 10^{-10} \text{ A} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ A}$ , 响应时间快, 噪声水平低的微电流放大器才能满足反应性精度测量误差的要求。要实现这个目的, 要求微电流放大器具有很高的输入阻抗和较低的输出阻抗, 噪声低、漂移小、零点摆动小。为对空间效应进行修正的需要, 小电流放大器必须具有较快的响应速度及无超调的过渡特性。而在一般的射线测量中往往采用慢变化的弱电流放大器, 输出噪声较大, 响应时间慢, 零点摆动大而达不到反应性测量技术要求, 因此需要研制专门的快响应低漂移微电流放大器。

## 1 微电流放大器的设计技术指标

为适应反应性的测量, 微电流放大器的设计技术指标如下:

a. 输入电流范围:  $1 \times 10^{-10} \text{ A} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ A}$ ;

收稿日期: 2008-11-17

作者简介: 彭宵微(1983—), 男, 汉, 安徽省马鞍山市人。南华大学核科学技术学院 06 级硕士研究生, 核探测专业。

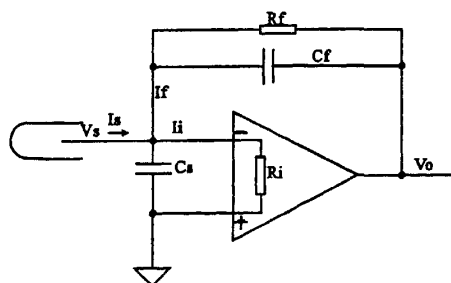


图 1 微电流放大器原理图

- b. 档位:  $1 \times 10^{-10} \text{ A}$ ,  $1 \times 10^{-9} \text{ A}$ ,  $1 \times 10^{-8} \text{ A}$ ,  $1 \times 10^{-7} \text{ A}$ ,  $1 \times 10^{-6} \text{ A}$ ,  $1 \times 10^{-5} \text{ A}$ ,  $1 \times 10^{-4} \text{ A}$ ;
- c. 输出电压:  $0 \sim 10 \text{ V}$ ;
- d. 零点漂移:  $\leq 5 \text{ mV}/8 \text{ h}$ ;
- e. 档位零点差:  $\leq 5 \text{ mV}(\text{DC})$ ;
- f. 档位线性误差:  $< 1\%$ ;
- g. 仪器自检: 通过  $1 \times 10^{-8} \text{ A}$  档对硬件自检;
- h. 无超调时间常数:  $\leq 6 \text{ ms}(1 \times 10^{-8} \text{ 档})$ 。

## 2 微电流放大器原理及瞬态响应分析

设增益为  $-K$  的直接耦合放大器与作为反馈的程电阻  $R_f$  如图 1 所示连接起来, 便构成了微电流放大器。假定放大器输入阻抗  $R_i$  与放大倍数  $K$  均为无穷大的理想运放, 则由电

路的稳态分析可得：

$$V_s = -V_o/K$$

因为放大器的输入阻抗  $R_i$  为无穷大，所以输入电流必然流过量程电阻  $R_f$ ，因此，可以得到：

$$I_f = (V_s - V_o)/R_f = (-V_o/K - V_o)/R_f = (-V_o - KV_o)/KR_f = -(V_o/R_f)[(1+K)/K]$$

(因为  $K \gg 1$ )  $I_f \approx -V_o/R_f$  即  $V_o = -I_f R_f$

(又因为  $R_i$  为无穷大)  $V_o = -I_s R_f$

可见，在  $R_f$  已知的情况下，只要测量出  $V_o$  的大小，就可以求得电流  $I_s$  的大小。输出电压  $V_o = -I_s R_f$ 。理论上只要电阻  $R_f$  取得足够大，即使电流  $I_s$  很小，也可得到较大输出电压  $V_o$ 。例如， $R_f = 10^{10} \Omega$ ， $I_s = 10^{-11} A$ ，则  $V_o = I_s R_f = 100 mV$ 。

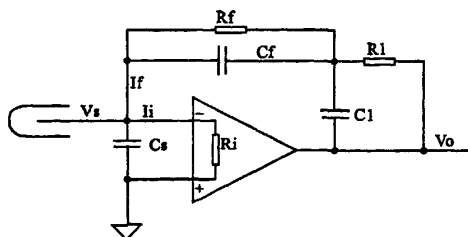


图2 使用延迟网络原理图

为了增强电路的瞬态响应，提高响应速度，

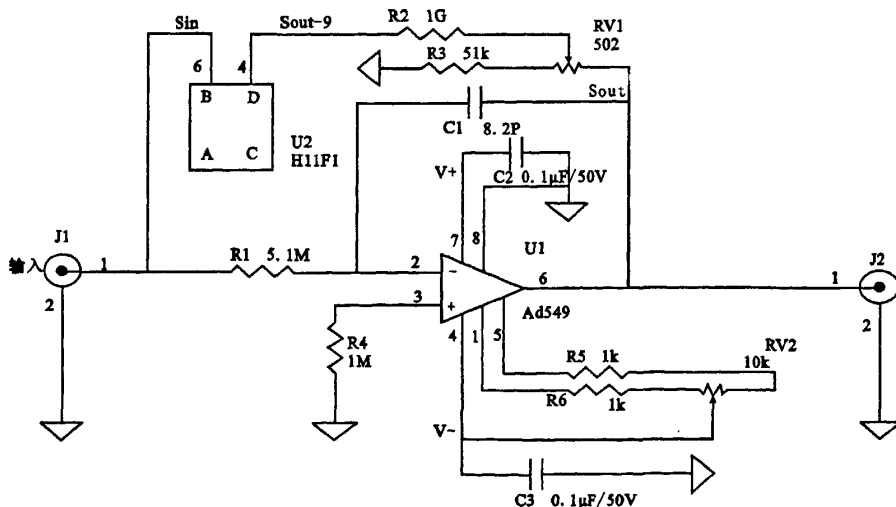


图3 基于AD549微电流放大器

为获得更高的测量灵敏度，最简单的方法是增大反馈电阻，可是大于  $10^9 \Omega$  的电阻价格昂贵、体积大、噪声也更大，同时还不稳定。为了避免这些同时又得到满意的电路输出

对于给定的  $R_f$  值，我们必须使  $C_i$  和  $C_f$  小，而  $K$  要大。要减小  $C_i$  影响，可以采用在反馈通路中使用延迟网络，如图2所示。

### 3 基于AD549微电流放大器

图3是基于AD549微电流前置放大器原理图， $R_1$ 为AD549输入限流保护电阻，主要是防止运放在工作条件下，当输入信号电压超过供电电压，导致运放损坏或输入电流漂移和电压漂移。保护电阻的选择主要是保证输入电流在  $1 mA$  时，时间不能超过1秒，或者电流在  $100 \mu A$  时长期工作，但要注意的是同时会引入噪声。 $C_1$ 用于消除超调， $R_5$ 、 $R_6$ 和RV2组成AD549前置放大器的调零电路，其自动稳零采用的方法是在AD549的第1脚和第5脚接一个电位器，中心触点接到负电源输入端。 $R_2$ 、 $R_3$ 和RV1组成AD549前置放大器的增益调节电路。RV1调节测量精度， $R_2$ 为反馈电阻通过控制U2来实现放大器的换档。U2选用隔离电阻大于  $10^{13} \Omega$  以上的光耦FET开关。在这个电路中没有加后级的电压主放大电路，是因为电压主放大电路将产生较大的噪声信号，所以电压放大电路尽量不要和微电流放大电路放到同一个屏蔽盒中。

增益，如图3引入  $R_3$  和RV1。接入后的缺点是在同一增益中引入漂移电压误差和噪声，但是精度性能对AD549很容易达到平衡。

## 4 电路工艺技术

### 4.1 元器件的选取

要实现微电流测量,运放须满足以下要求:

①输入阻抗  $R_i \gg$  反馈电阻  $R_f$ ; ②偏置电流  $I_i <$

被测电流  $I_i$ ; ③失调电压及漂移小; ④增益与共模抑制比高; ⑤噪声小。现选用 AD 公司生产的集成运放 AD549, AD549 的主要参数见表 1。

表 1 AD549 主要参数

输入电流偏移	输入电压偏移	温度漂移	输入电流噪声	输入电压噪声	输入共模阻抗	电压增益
60fA	0.25mV	2 $\mu$ V/°C	0.36rms	0.35 $\mu$ V	10 <sup>15</sup> $\Omega$	100dB

电阻选用高精度( $\pm 1\%$ 甚至为 $\pm 1\%$ )、低噪声、温度系数小、稳定性好的金膜电阻;反馈电容选用高绝缘电阻( $\geq 10^{12}\Omega$ )、低漏电流和温度系数小的防湿型聚苯乙烯电容,其它电容选用低噪声的瓷介、云母或钽电容。其次为减小输入电缆的分布电容,提高响应速度,可选用小容抗特性的双屏蔽电缆。

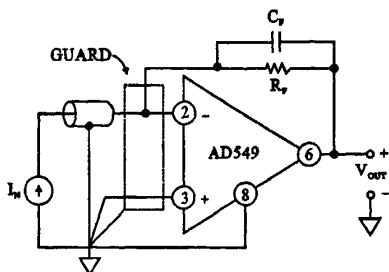


图 4 基于 AD549 接地方法

### 4.2 印制板绘制

选用漏电流远小于 pA 级(按测量精度确定)的高绝缘电路板,如环氧玻璃板或更好的聚四氟乙烯板;输入端及反馈回路元器件间距要大;要大面积敷铜;1 脚与 8 脚滤波电容要尽量靠近管脚;并且在信号输入端 2 脚与 3 脚用接地屏蔽环包围,电路必须采用一点接地法(如图 4 所示);元件摆放与电路布局必须简洁,信号输入线要采用尽量短的低损耗屏蔽电缆。

### 4.3 元件焊接

焊接时电烙铁要接地防止静电;高阻元件不要用手直接拿取,否则会影响高阻元件的阻抗特性。

### 4.4 清洗

电路安装好后,用纱布蘸取异丙基或酒精清除元器件与电路残留灰尘和杂质,并在 80°C 进行烘烤 10 分钟、作密封防潮处理。

## 5 调试技术

(1)调试前在输入端应并 4700pF 的等效电容,以代替电离室探测器;

(2)从高档位开始调零点,零点稳定时间长,不能用示波器和电压表同时测量零点噪声。档位间零点误差要小于 5mV。

(3)响应时间和噪声是相互影响的,响应速度太快不仅噪声会随之增加,还会产生超调和振荡现象,这将使空间效应的修正无法进行。为了低噪声和防止超调现象,在满足噪声的前提下,尽量减小响应时间。因此,需要在反馈电阻上并联小电容,在高量程时,与量程电阻相并联的电容的大小对响应时间的影响起主要作用,如果选配不当,可能产生较大的噪声或超调,因此要仔细的调节。响应时间  $t$  与并联小电容  $C$  的对应关系见表 2。(说明:‘未并’表示没有并联电容,‘并’表示并联了电容。)

表 2 响应时间  $t$  与电容  $C$  对应表

范围	10 <sup>-8</sup> A	10 <sup>-7</sup> A	10 <sup>-6</sup> A	10 <sup>-5</sup> A	10 <sup>-4</sup> A
C	未并	未并	并 47pF	并 200pF	并 470pF
t	8.3ms	316.7 $\mu$ s	99.7 $\mu$ s	35.1 $\mu$ s	16.4 $\mu$ s

## 6 调试结果

将上述基于 AD549 运放的微电流放大器应用于反应堆实验测量仪中, 电流分辨率为  $10^{-12}$  A, 量程控制在  $10^{-12} \sim 10^{-4}$  A 间转换, 自动校零, 响应时间小, 不需预热, 漂移小, 稳定可靠, 整体性能良好。按要求其测量的性能参数如下:

(1) 测量误差:  $10^{-11}$  A  $\leq 5\%$ ;  $10^{-10}$  A  $\leq 3\%$ ;  $10^{-9}$  A  $\leq 2\%$ ;  $10^{-8}$  A  $\leq 1\%$ ;  $10^{-7}$  A  $\sim 10^{-4}$  A  $< 0.1\%$ ;

(2) 响应时间(稳定输出值从 0~90% 所需要的时间):  $10^{-11}$  A  $\leq 4.0$  s;  $10^{-10}$  A  $\leq 0.8$  s;  $10^{-9}$  A  $\leq 0.2$  s;  $10^{-8}$  A  $\leq 0.06$  s;  $10^{-7}$  A  $\leq 0.015$  s;  $10^{-6}$  A  $\sim 10^{-4}$  A  $\leq 0.005$  s; 在输入端接 4700pF 电容

不影响上升时间。

## 7 结论

实验表明, 该微电流放大器具有噪声低、漂移小、零点摆动小、响应速度快的特点, 完全满足反应堆物理试验中, 反应堆反应性的测量技术要求。

### 参考文献:

- [1] 蔡锦福. 运算放大器原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 7.
- [2] 核电子学讲义[M]. 北京: 原子能出版社.
- [3] 王芝英. 核电子技术原理[M]. 北京: 原子能出版社, 1989.

## Design and Manufacturing of Quick-Response Low-Drift Micro-Curren Amplifier

PENG Xiao-wei<sup>1</sup>, HE Shao-qun<sup>2</sup>, FU Guo-en<sup>2</sup>

(1. University of South China, Hengyang 421001; 2. Nuclear power institute of China, Chengdu 610041)

**Abstract:** The thesis introduces working principle, circuit design and manufacturing technology and debugging technique of the high-precision quick-response low-drift micro-current amplifier based on AD549. As one of the key parts measuring the reactivity of nuclear reactors, it has the feature of low noise, quick response and low drift, which is one of the important factors for precise measurement of reactivity.

**Key words:** AD549, micro-current amplifier, design

---

(上接第 222 页, Continued from page 222)

## Design of HY136 Six-channel Radiation Level Annunciator

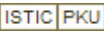
FU Xun-ru

(The Third Sub\_Institute of Nuclear Power Inistitute of China ChengDu SiChuan 610041)

**Abstract:** Counting of the output impulses of the six-channel nuclear radiation detector with the two NEC8253 counters on the parallel bus of the micro processor, which will count and display the radiation level of each channel. When any one channel's radiation level higher than the setup level, the blue light will be off and the red light will be on, and make alarm, in order to warn operators off the radiation working area.

**Key words:** Nuclear radiation, Annunciator, Multi-channel, Fast response

# 快响应低漂移微电流放大器的设计与制造

作者: [彭宵微](#), [何绍群](#), [付国恩](#), [PENG Xiao-wei](#), [HE Shao-qun](#), [FU Guo-en](#)  
作者单位: [彭宵微, PENG Xiao-wei \(南华大学, 湖南, 衡阳, 421001\)](#), [何绍群, 付国恩, HE Shao-qun, FU Guo-en \(中国核动力研究设计院, 四川, 成都, 610041\)](#)  
刊名: [核电子学与探测技术](#)   
英文刊名: [NUCLEAR ELECTRONICS & DETECTION TECHNOLOGY](#)  
年, 卷(期): 2009, 29(1)  
被引用次数: 0次

## 参考文献(3条)

1. [蔡锦福](#) [运算放大器原理与应用](#) 2005
2. [核电子学讲义](#)
3. [王芝英](#) [核电子技术原理](#) 1989

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hdzxytcjs200901054.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_hdzxytcjs200901054.aspx)  
授权使用: 浙江大学(wfzjdx), 授权号: aaa4383d-2945-4334-b618-9e5300dd1ed5

下载时间: 2010年12月21日