

# 高性能微电流集成放大器的设计

陈国杰, 曹 辉

(佛山大学理学院, 广东佛山 528000)

**摘要:**介绍了用 ICL7650 运算放大器设计高性能微电流集成放大器的方法, 阐述了电路的工作原理和提高放大器性能的措施, 给出了实际应用的实验结果。该放大器测量范围  $10^{-9} \sim 10^{-12}$  A, 自换量程, 自动校零, 测量准确, 工作稳定。

**关键词:**微电流放大器; ICL7650; 高性能; 设计

**中图分类号:** TN722.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2005)03-0243-03

夫兰克-赫兹实验是用电子与原子碰撞的方法证实原子能级量子化的著名实验, 其电流信号变化缓慢且非常微小, 一般在  $10^{-9} \sim 10^{-12}$  A。当电流小于  $10^{-9}$  A 时, 用磁电式电流计测量已十分困难, 目前常用高输入阻抗的静电计管电流放大器测量。但是静电计管存在寿命短、体积大、供电复杂、预热时间长、零点和满刻度校正烦琐等缺点。随着高阻抗、高性能运算放大器的出现, 研制微电流集成放大器已成可能。我们用 ICL7650 运算放大器为夫兰克-赫兹实验的微电流测量研制了一种高性能集成放大器, 测量范围  $10^{-9} \sim 10^{-12}$  A (国产运算放大器微电流放大器目前一般测到  $10^{-10}$  A<sup>[1]</sup>), 自换量程, 自动校零, 响应快, 体积小, 测量准确, 稳定性好。

## 1 微电流测量原理

微电流信号源可以看作内阻非常大的电流源  $I_S$ , 具有接地端的微电流测量原理如图 1 所示<sup>[2]</sup>。对于输入阻抗和放大倍数均无穷大的理想运算放大器, 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, 也可得到较大的输出电压  $V_o$ 。例如  $R_f = 10^{10} \Omega$ ,  $I_S$

$= 10^{-12}$  A, 则  $V_o = -I_S R_f = 0.01$  V。

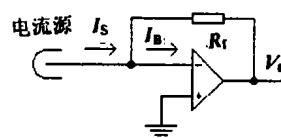


图 1 微电流测量原理

实际上, 运算放大器输入阻抗不是无穷大, 电阻  $R_f$  的增大要受到运算放大器输入阻抗的限制。考虑偏置电流  $I_B$  对被测电流  $I_S$  的分流, 则  $V_o = -(I_S - I_B) R_f$ , 如果  $I_B$  大于  $I_S$ , 则  $I_S$  无法测量。

影响微电流测量灵敏度的首要因素是运算放大器的偏置电流  $I_B$ , 其次是噪声电压和零点漂移。要实现微电流测量, 运算放大器要满足: ①偏置电流  $I_B <$  被测电流  $I_S$ ; ②输入阻抗  $R_i >$  反馈电阻  $R_f$ ; ③增益、共模抑制比高; ④失调电压及漂移小; ⑤噪声小。

## 2 电路设计和分析

### 2.1 运算放大器的选择

随着场效应管技术的发展, 输入阻抗在  $10^{12} \Omega$  以上的运算放大器已不少, 如 LF357, 但是并不是高阻运算放大器都能做出高性能微电流放大器。因为在如图 1 中所示的放大器中, 为了提高测量灵敏度, 反馈电阻  $R_f$  常取在  $10^9 \Omega$  以上, 近似于开环放大, 所以线性范围很小, 调零和稳零很困难, 且高阻  $R_f$  与分布电容、负载

收稿日期: 2004-08-05

基金项目: 广东省教育厅自然科学基金(Z02069)。

作者简介: 陈国杰(1965—), 男, 湖南人, 佛山大学理学院副教授, 主要从事物理电子应用研究

电容产生相移容易自激振荡。

ICL7650 是采用 CMOS 工艺集成的斩波稳零高精度运算放大器,输入电阻  $10^{12}\Omega$ ,偏置电流 25℃时为 1.5pA,输入失调电压  $1\mu\text{V}$ ,失调电压温度系数  $0.01\mu\text{V}/\text{C}$ ,共模抑制比 130dB<sup>[3]</sup>,性优价廉,尤其具有其他高阻运算放大器没有的自动稳零优点,适合作缓变微电流放大器。但是斩波频率低(200Hz),输出信号有斩波尖峰噪声,要接较大时间常数的低通滤波器,所以不适合测量快变信号。

## 2.2 电路设计

本文设计的微电流放大器要求测量范围为  $10^{-9}\sim 10^{-12}\text{A}$ ,电流变化范围大,因此放大器由可编程的 ICL7650 前置放大器和电压放大器两部分组成,利用内置 A/D 转换器的单片机 AT90S8535(与弗兰克—赫兹实验仪共用)采集电流数据和切换量程,用液晶屏(LCD)显示电流,如图 2 所示。

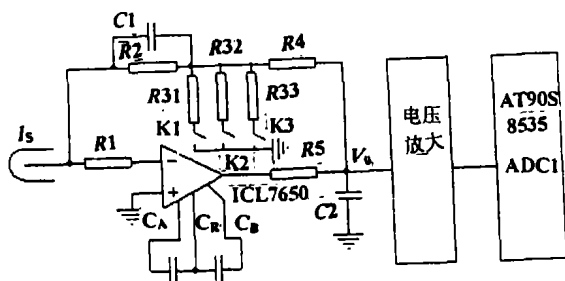


图 2 程控微电流集成放大器

在图 2 中,  $R_1$  为 ICL7650 输入限流保护电阻,  $C_1$  与  $R_2$  组成反馈补偿网络,降低带宽,防止  $R_2, R_3, R_4$  与  $C_2$  相移产生自激振荡,  $R_5$  与  $C_2$  用来滤去 ICL7650 的斩波尖峰噪声。

为了能测量  $10^{-12}\text{A}$  的微小电流,图 1 中的  $R_f$  要选  $10^{10}\Omega$  电阻,这样大的电阻精度低,稳定性差,噪声也大,因此在图 2 中用小电阻  $R_2, R_4$  与  $R_{31}$  ( $R_{32}$  或  $R_{33}$ ) 组成 T 型网络代替图 1 中高阻  $R_f$ 。  $R_{31}, R_{32}$  与  $R_{33}$  的通断分别由单片机 AT90S8535 控制的小型继电器开关  $K_1, K_2$  与  $K_3$  来实现,从而切换量程。选择  $R_2, R_4, R_{31}, R_{32}$  和  $R_{33}$  的阻值,使  $10^{-9}\sim 10^{-12}\text{A}$  各量程的等效电阻  $R_f$  分别为  $10^8, 10^9$  和  $10^{10}\Omega$  (分三挡)。用  $R_3$  表示  $R_{31}, R_{32}$  或  $R_{33}$  分别接入电路时该支路的阻值,则 ICL7650 的输出电压  $V_o$  经后面电压放大后送入单片机 AT90S8535 的 ADC1 端口进行 A/D 转换,测量电流用单片机扣除放大器的零点漂移后由 LCD 显示。由于采用了单片

机,故能实现自换量程、自动校零以及过流保护。

## 3 提高性能的措施

要测量微电流,放大器必须降低噪声、提高性能,除了选择高性能运算放大器,我们采取了以下措施。

### 3.1 降低运算放大器的工作温度

由运算放大器的温度特性可知,温度每升高  $10\text{C}$ ,运算放大器的偏置电流将增加 1 倍<sup>[3]</sup>,从而降低微电流测量的灵敏度和准确度。为此,尽可能降低电源电压,增大负载电阻(大于  $10\text{k}\Omega$ ),以减小运算放大器的工作电流,降低工作温度。

### 3.2 不接运算放大器的平衡电阻

实验证明,在高内阻电流源的微电流放大器中,运算放大器接平衡电阻不仅很难使输入电阻平衡,反而增加电路噪声,所以图 2 的 ICL7650 运算放大器同相端不接平衡电阻,而是直接接地。

### 3.3 减小 PCB 漏电流

在微电流测量中,提高 PCB 的绝缘强度和减少漏电流非常重要。假设运算放大器的同相端与反相端的绝缘电阻为  $10^{11}\Omega$ ,通常认为该绝缘电阻已相当大了,但当输入电压为  $1\text{V}$  时,运算放大器同相端与反相端的漏电流将达到  $10\text{pA}$ ,是 ICL7650 偏置电流的 7 倍,严重影响电流的测量。

为了减少 PCB 的漏电流,我们采取以下措施:选用漏电流远小于  $\text{pA}$  级的高绝缘电路板,如环氧玻璃板;输入信号采用绝缘好、不产生静电,吸湿性小的聚四氟乙烯接线柱;在电路板上用接地屏蔽环将运算放大器的同相、反相输入端被包围起来,使其等电位,保证它们之间漏电流为零;电路安装好后,清除残留杂质,元件、电路板作清洁、干燥、防潮处理。

### 3.4 提高信噪比

电阻选低噪声的 1% 精度金膜电阻;电容选低噪声的瓷介、云母或钽电容;电源两级 LC 滤波,降低噪声;电源线尽量远离输入信号线;信号输入线用尽量短的屏蔽电缆;在电源部分和放大器的输出部分大面积敷铜,放大器的输入部分大面积敷铜,与电源一点接地;整个微电流放大器用金属屏蔽。

#### 4 应用

在弗兰克-赫兹实验中,用本设计的集成放大器代替以前的静电计管电流放大器测量电子的微小电流。实验表明,本放大器可测量  $10^{-9} \sim 10^{-12}$  A 的微小电流,自换量程,自动校零,响应时间  $< 0.1$  s,体积小(55 mm  $\times$  80 mm  $\times$  20 mm),稳定可靠,使用三年来从未坏过,整体性能优于静电计管电流放大器<sup>[4]</sup>。

#### 参考文献:

- [1]周波,等.弱电流测试仪的研制[J].核电子学与探测技术,2003,23(1):94.
- [2]王芝英.核电子技术原理[M].北京:原子能出版社,1989.
- [3]赵保真,等.简明集成运算放大器手册[M].北京:科学出版社,1989.5.
- [4]陈国杰,等.智能弗兰克-赫兹实验测量仪的研制[J].大学物理,2002,21(6):

### The design of high performance weak current integrated amplifier

CHEN Guo-jie, CAO Hui

(School of Science, Foshan University, Foshan of Guangdong Prov. 528000, China)

**Abstract** A design method of high performance weak current integrated amplifier using ICL7650 operational amplifier is introduced. The operating principle of circuits and the step of improving amplifier's performance are illustrated. Finally, the experimental results are given. The amplifier has programmable measurement range of  $10^{-9} \sim 10^{-12}$  A, automatic zero-correction, accurate measurement, and good stability.

**Key words:** weak current amplifier; ICL7650; high performance; design

(上接第 258 页, Continued from page 258)

- [2]Becvár F, et al. A high-resolution BaF<sub>2</sub> positron-lifetime spectrometer and experience with its long-term exploitation [J]. Nucl Instrum Methods, 2000, A 443: 557.
- [3]章志明,等. BaF<sub>2</sub> 正电子寿命谱仪时间分辨率的改进[J].核电子学与探测技术,2004,24(5):490.
- [4]Chang Tianbao, et al. Improvement on application of BaF<sub>2</sub> scintillation count to a positron lifetime spectrometer [J]. Nucl Instrum Methods, 1987, A 256:398.
- [5]Wei ZY., et al. Light yield and surface treatment of barium fluoride crystals [J]. Nucl Instrum Methods, 1991, B61: 61.
- [6]Saito H, Y et al. A new positron lifetime spectrometer using a fast digital oscilloscope and BaF<sub>2</sub> scintillators [J]. Nucl Instrum Methods, 2002, A 487: 612.
- [7]张天保,等. 国产锗酸铋(BGO)闪烁体定时性能的研究[J].高能物理与核物理,1983,7:674.

### Timing characteristic of photomultiplier studied on dynode signals

LI Dao-wu<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-ming<sup>2</sup>, WANG Bao-yi<sup>2</sup>,  
MA Chuang-xin<sup>2</sup>, WEI Long<sup>2</sup>, ZHANG Tian-bao<sup>2</sup>, BAI Li-xin<sup>1</sup>

(1. Sichuan University, Chengdu of Sichuan Prov. 610064, China;  
2. Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract** A circuit for taking out timing signal from one dynode of photomultiplier is described. The generation of dynode signal is analyzed and its timing characteristic is studied. This type of positron lifetime spectrometer consists of a pair of BaF<sub>2</sub> scintillators coupled to photomultipliers XP2020Q and related electronics, which is a fast-slow coincidence system using ORTEC 935 CFD, ORTEC 567 TAC modules. The best timing resolution recorded at 2 : 1 energy window by <sup>60</sup>Co is 138 ps in the way of the fast timing signal is taken from dynode 9. It improves the timing resolution of spectrometer very much in comparing with conventional methods.

**Key words:** photomultiplier; XP2020Q; timing characteristic; timing resolution