Journal of Sensor Technology and Application 传感器技术与应用, 2022, 10(1), 1-6
Published Online January 2022 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/jsta
https://doi.org/10.12677/jsta.2022.101001

Hans汉斯

微弱电流信号测量方法的研究论述

薛晴月

成都理工大学，四川 成都

收稿日期：2021年11月6日；录用日期：2021年12月3日；发布日期：2021年12月15日

摘 要

生产实践、科学研究中存在着大量的微弱电流信号，对于高精密仪器而言，微弱电流信号的准确测量关系着仪器的正常使用情况。但因其值微弱，易受干扰影响，微弱电流的测量一直是人们在探讨和关注的焦点。本文介绍了目前微弱电流测量的发展现状和两种常用基本测量方法I-V变换法和I-F变换法的原理及其对比分析，并给出了两种测量方法在使用过程中提高测量性能的措施方法。

关键词

微弱电流测量，测量方法原理，I-V变换法，I-F变换法，措施方法

Research and Discussion on Measuring Method of Weak Current Signal

Qingyue Xue

Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: Nov. 6th, 2021; accepted: Dec. 3rd, 2021; published: Dec. 15th, 2021

Abstract

There are a large number of weak current signals in production practice and scientific research. For high-precision instruments, the accurate measurement of weak current signals is related to the normal use of the instrument. Because of its weak value and susceptibility to interference, the measurement of weak current has always been the focus of discussion and attention. This article introduces the current development status of weak current measurement and the principles and comparative analysis of the two common basic measurement methods current-to-voltage conversion method and current-to-frequency conversion method, and provides measures to improve measurement performance during the use of the two measurement methods.

文章引用: 薛晴月. 微弱电流信号测量方法的研究论述[J]. 传感器技术与应用, 2022, 10(1): 1-6.
DOI: 10.12677/jsta.2022.101001

Keywords

Weak Current Measurement, Principle of Measurement Method, Current-to-Voltage Conversion Method, Current-to-Frequency Conversion Method, Measure Method

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

人类在探索未知世界的过程中，为了获取未知的信息，往往需要将未知量转化为某种可以感知的物理量。随着现代科学技术的发展，人类对自然界的探索越深入，那么需要测量的信号就愈发微弱[1]。微弱电流就是这样的一种物理量，其检测广泛应用于分析化学、物理学、测试计量、生物医学、地理学等领域，如航空航天领域的航天器[2]、核行业中的电离室输出电流检测仪器、生物医学领域的生物电检测仪器以及半导体行业漏电流测试等，微弱电流都扮演着重要的角色。由此可见，对微弱电流测量方法的研究不仅仅是科学进步的需要，更是促进科学研究进步不可或缺的工具。

2. 微弱电流信号测量发展现状

由于科学技术研究的需要，微弱电流信号测量技术的发展突飞猛进，各种新的测量原理、方案、算法、设备仪器等都在不断的更新。电流分为直流和交流两种，本文主要探讨直流电流信号测量技术研究及应用发展。

由于新中国成立初期阶段科学技术发展速度缓慢，因此对微弱电流测量技术的研究也落后于西方发达国家。我国最早的关于微弱电流测量技术的文献是在 20 世纪 50 年代张万杭与武以立等发表的一篇关于探讨单管静电计电路的比较的文章，文中分别介绍了在微弱电流测量中四种桥式电路的优缺点[3]。经过国内专家学者们几十年对相关测量技术不断的研究和完善，目前由北京市劳动保护科学研究所研制 EST121 型数字超高阻、微电流测量仪代表着国内微电流测量领域的顶尖水平，可测量 0.1 fA~0.2 mA 范围内的微电流信号。而国外针对微弱电流测量的技术研究起步较早，研究时间较长，就目前来看也更为成熟。1949 年晶体管问世，其在直流放大器上的成功运用加快推动了微弱电流测量技术的发展，目前美国 Keithley 公司的 6430 亚飞安源表代表着全球商用静电计的领先水平，该微电流测量仪器的最小电流分辨率低至 0.01 fA (即 10^{-17} A)，具有较高的测量精度和较小的电流噪声，可通过模拟开关控制选择不同的测量档位测量不同量程的输入信号值[4] [5] [6]。

目前常用的微弱电流测量方法有两种，一种是将微弱电流信号转换为电压信号，即 I-V 变换法，另一种是通过时间积分的方式将微弱电流信号转换为频率，即 I-F 变换法。当前市面上的大部分微弱电流测量仪器是用于实时采集系统，如电离室输出电流信号、半导体行业的芯片设计等，此类仪器考虑采集信号的实时性，设计原理是多是 I-V 变换法。对于 I-F 变换法，由于需要积分时间，主要的应用场景是采集变化很慢又微弱的电流信号，如核行业中的光电倍增管输出信号、辐射场的环境剂量监控控制[7]等。随着科学技术的发展，现实生活的微弱电流信号的采集要求将各不相同，这需要有针对性的研究新的测量方案。相对于单一技术而言，根据微弱电流信号的不同测量特点，微弱电流信号的测量正逐步趋向多种测量方法结合使用的方向发展。同时数字技术的发展也推动了软件和虚拟仪器的发展，仪器通过与软

件结合设计出基于计算机的高精度的、高效的、复杂的信号测量算法和信号滤波算法，并将其嵌入测量仪器，将使得微弱电流信号的测量精度得到进一步提升[8] [9] [10] [11]。

3. 基本测量方法

3.1. 两种测量方法基本原理

3.1.1. I-V 变换法

I-V 变换法输入阻抗高，又称高阻法，其是将待测的微弱电流信号经过运放转换成与电流成正比的电压值，测量转换所得的电压信号通过 ADC 转换为数字信号以进行后续处理的方法。

I-V 变换的实质是一个跨阻放大器，见图 1。根据运算放大器理想模型的“虚短”和“虚断”特性，输出电压可近似为：

$$V_0 = I_f \times R_f = I_i \times A_f = -I_i \times R_f \tag{1}$$

式(1)中：V ——输出电压，V；I_f ——反馈电流，A；R_f ——反馈电阻，Ω；I_i ——待测输入电流，A；A_f ——放大倍数。则待测电流 I_i 可表示为：

$$I_i = -\frac{V_0}{R_f} \tag{2}$$

由公式(2)可知，I-V 变换法的待测输入电流的放大倍数是由反馈电阻的阻值决定的。

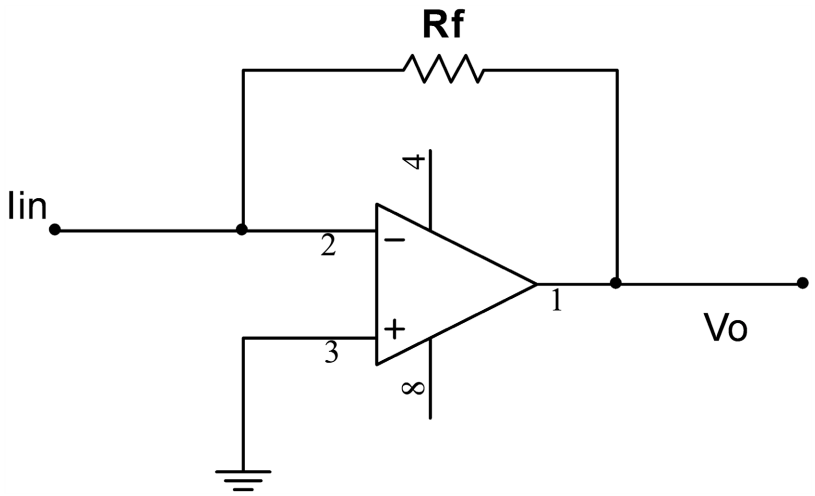

Figure 1. Schematic diagram of current-to-voltage conversion circuit
图 1. I-V 转换电路原理图

3.1.2. I-F 变换法

I-F 变换法具体实现路径有两种，一种是基于 I-V 转换电路，将经过 I-V 转换电路后得到的输出电压 V_0 转换为频率，通过测量频率获得待测微弱电流信号，此方法称为反馈式电流放大法；另一种是在反馈回路中接了稳定的积分电容，待测微弱电流信号对电容进行充电，将电流信号转换成锯齿波电压信号，电压信号通过比较器等电路转换成脉冲输出，单个脉冲代表固定的电荷量，总电荷量与脉冲个数成正比，进而得到待测微弱电流信号值，此方法称为反馈式电流积分法[12] [13] [14]。

反馈式电流积分电路见图 2，在理想情况下，当输入电流 I_{in} 不为零时，运算放大器不对输入电流 I_{in} 分流，输入电流 I_{in} 全部经过电容 C_1，此时输出端电压 V_0 为：

$$V_0 = \frac{I_{in}t}{C_1} \tag{3}$$

式(3)中，t——积分时间，s。

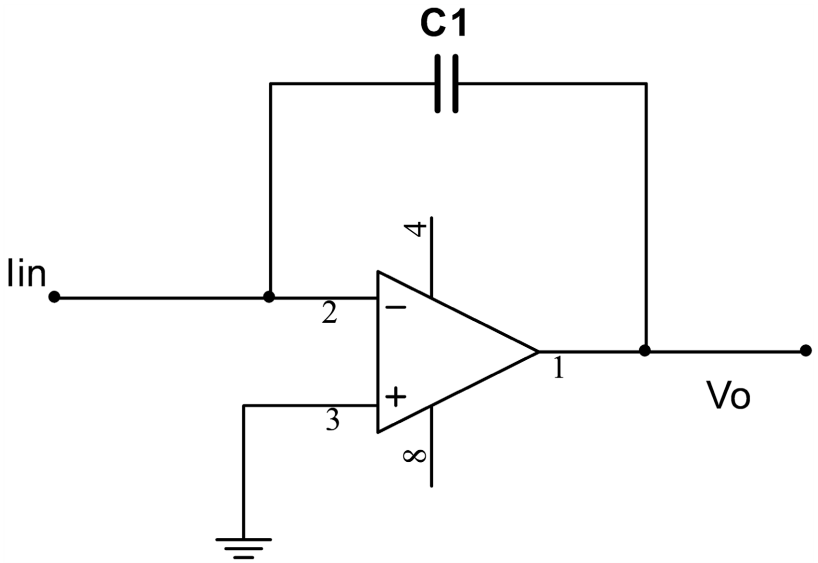

Figure 2. Schematic diagram of current integrator
图 2. 电流积分器原理图

3.2. 两种测量方法的对比分析

由测量方法理论部分分析可知，反馈式电流放大法是基于 I-V 变换法实现，因此此部分主要分析高阻法和反馈式电流积分法。

高阻法和反馈式电流积分法都可以测量微弱电流信号，高阻法通过使用高负载电阻放大输入信号实现对微弱电流信号的测量，反馈式电流积分法则是通过对输入信号的时间段积分完成对微弱电流信号的测量。两种方法都会使用运算放大器作为基本转换器件，运算放大器的输入偏置电流和失调电压都会对测量结果造成很大的误差，因此在使用两种测量方法测量微弱电流时运算放大器选型十分重要[15] [16]。

高阻法的转换精度依赖于运算放大器，高阻值反馈电阻易受电磁干扰和温湿度漂移影响，存在稳定性较差的缺点，所以使用此方法进行系统设计时，需要尽可能屏蔽掉外部因素的干扰。由基本测量原理部分的公式可知，当高阻法的待测输入电流为 pA 甚至 fA 级时，需要将其放大到便于测量的 mV 级电压，此时必须使用高阻值的反馈电阻才能将微弱电流信号放大到所需量级，反馈电阻值往往是在 10^9~10^{12} Ω [17]。在使用 ADC 将获得的模拟电压信号值转换为数字信号的环节中，ADC 的分辨率关系着微弱电流测量系统能够测量的量程范围，ADC 分辨率被定义为输入信号值的最小变化，这个最小数值变化会改变数字信号输出的数值，当待测输入信号的范围很大时，ADC 的分辨率不足以囊括所有待测范围，因此此方法多用于测量窄量程高频率的信号，如若确实需要使用高阻法完成宽量程的测量，则考虑使用多个高阻负载设置不同的放大档位进行相关设计。同时 ADC 可以在很宽的频率范围内保持相对恒定的量化分辨率，可实现对高频率输入信号的实时采集[18]。由此可见，此方法在使用的过程中需要着重考虑 ADC 型号选择。

反馈式电流积分法是一种时间段处理方法，使用脉冲计数完成了微弱电流信号的数字化，避免了 ADC 对系统的掣肘，保留了传统线性转换在系统精确性方面的优点。在输入信号频率较低时，由于积分计数时间窗口 Δt 较大，可以获得较多的计数脉冲，故可以获得较高的量化分辨率，但随着输入信号频率

的升高，为了满足奈奎斯特采样条件，计数时间窗口 Δt 被迫不断变窄，获得的计数脉冲渐次变少，分辨率也随之降低[19]，在实际应用中，此方法用于实现低频率信号的测量。反馈式电流积分电路使用反馈电容，反馈电容的温度系数远低于高值反馈电阻且电阻没有约翰逊热噪声干扰，同时电流的积分效应也有利于抑制噪声增加抗干扰能力，但是选取的反馈电容值越大，抑制噪声的能力在不断提高的同时也增加了输入时间常数值，降低了整个系统的测量速度，所以此方法不能够应用于实时采集和高速信号转换的系统中[15]。

4. 误差及解决方案

“微弱信号”主要是指被噪声淹没的信号，只靠简单放大并不能得到准确的微弱信号，只有在有效地抑制噪声的条件下，对微弱信号的幅度进行放大，才能提取出有用的信号。微弱电流有个普遍的定义，即不大于 10^{-6} 安培的电流信号[20]，其具有极低的幅度，由于一些非常小的因素干扰而引起的信号波动，经过运放放大后都能使最终的测量结果出现很大的误差。因此想要获得高精度的测量系统，不但需要提高测量电路对待测微弱电流信号的放大能力，还需尽可能地抑制噪声对系统性能的影响。

为了减少外界所带来的干扰，特别是电磁干扰，对测量信号的影响，在系统设计环节中要充分的考虑对硬件电路和信号进入的过程做各种屏蔽的措施。

1) 设计更为合理的 PCB 材料、电路布局和结构，保持 PCB 板板面的清洁。不同的 PCB 板材的绝缘性能不同，选择绝缘性能更好的材料制作电路板，能够有效得减少信号损耗，更合理的电路布局和结构可以减少电路结构中的分布电容或分布电感的干扰噪声耦合到附近的电路导线中。PCB 板的污染源，如清除焊剂残留、灰尘以及其他颗粒堆积等会形成弱电池进而对测量结果造成不必要的误差，因此在设计过程中应保持 PCB 板面的清洁。

2) 增加隔离屏蔽罩，这个测量仪器需加设金属铝盒。在整个电路中，放大电路和滤波电路外围应加设隔离屏蔽罩，屏蔽罩保持与地连接，消除电磁干扰对测量电路的影响。仪器外壳接地，选用金属铝盒可以在一定程度上减小微电流信号受到的外界干扰。

3) 选择同轴电缆作为信号输入线。微弱信号的输入需要处于对外完全封闭的状态，同轴电缆有非常强的抗干扰能力。将同轴电缆作为信号输入线能有效的避免在信号进入到被检测的过程中产生的干扰[21] [22] [23] [24] [25]。

除了对硬件部分的噪声抑制，还可以在使用了上述抑制措施的基础上在软件中加入合适的滤波算法，进一步滤除噪声。

在仪器的使用过程中，基于高阻法或反馈式电流放大法设计的电路中使用了高值电阻，高值电阻具有一定的温度系数和较强的介质吸收现象，会出现实际电阻值和标定电阻值可能不同的情况，从而导致误差，因此为了保证实验数据的准确，选择在适宜温度的测试环境使用仪器会得到更准确的测量结果。同时系统在操作过程中的应当减少机械振动，因机械振动会因切割磁力线而感应出干扰噪声，进而影响测量结果[26]。

5. 结论

随着电子技术不断发展，微弱电流在生活中的应用越来越广泛，其准确测量也愈加重要。微弱电流测量是一件复杂且精细的工作，在测量系统设计和测试阶段要充分考虑多种因素可能导致的误差并采用相应的抑制措施以提高测量系统性能，保证测量结果的准确。本文描述了微弱电流测量技术的发展现状和趋势，微弱电流测量基本方法原理和对比以及提高微弱电流测量性能可采取的抑制噪声措施，对微弱电流测量系统的设计和研究有一定的参考价值。

参考文献

[1] 王卫勋. 微电流检测方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2007.

[2] 郑玉展, 张志平, 李衍存, 等. 航天器内带电效应的微弱电流监测技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(1): 21-26.

[3] 张万杭, 武以立, 黄隆滋. 单管静电计电路的比较[J]. 四川大学学报(自然科学版), 1959(4): 81-90.

[4] Klubert, L.M. and Obolewski, G. (2000) Source Measure Unit Current Preamplifier. US Patent No. US6069484A.

[5] Keithley (2014) Low Level Measurements Handbook. 7th Edition, Keithley Instrument, Inc., Solon.

[6] Keithley (2005) Counting Electrons: How to Measure Currents in the Attoampere Range. Adam Daire, Keithley Instrument, Inc., Singapore.

[7] 花锋, 杜俊涛, 郑勋涛, 等. 核电厂堆用核仪器技术现状与发展趋势[J]. 核电子学与探测技术, 2019, 39(4): 517-522.

[8] 梁培艳. 微弱直流电压信号检测[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2013.

[9] 叶磊. 高精度数字程控微电流测量装置的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2019.

[10] Lukin, V.G. and Khvostenko, O.G. (2020) Desorption Processes in the Measurement of Weak Currents. *Physics-Uspekhi*, **63**, 487-499.

[11] Shao, J.-Q., He, G.-K., Zhao, J.-B. and Tian, H.-Y. (2016) Development of Wide Range Weak Current Measurement Device for Nuclear Reactor Neutron Flux Monitoring. *Annual Report of China Institute of Atomic Energy*, 198-199.

[12] 陈振生, 张玉林, 孙德芬, 等. 一种高精度微电流测量放大器的研制[J]. 电子设计工程, 2011, 19(20):72-75.

[13] Williams, J. (2013) Designs for High Performance Voltage-to-Frequency Converters. In: Dobkin, B. and Williams, J., Eds., *Analog Circuit Design*, Vol. 2, Newnes, London, 463-482. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397888-2.00018-3

[14] 刘小明, 彭静, 刘涛. 微弱电流测量中的 I-F 转换电路的设计[J]. 兰州交通大学学报, 2011, 30(3): 99-102.

[15] Brisebois, G. (2015) Opamp Selection Guide for Optimum Noise Performance. In: Dobkin, B. and Hamburger, J., Eds., *Analog Circuit Design*, Vol. 3, Newnes, London, 907-908. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800001-4.00422-1

[16] Linares-Barranco, B. and Serrano-Gotarredona, T. (2003) On the Design and Characterization of Femtoampere Current-Mode Circuits. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **38**, 1353-1363. https://doi.org/10.1109/JSSC.2003.814415

[17] 倪宁, 肖雪夫, 葛良全, 等. 微弱电流的 I-V 变换测量方法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(6): 665-669.

[18] Guo, Z., Liu, G., Wu, S. and Li, M. (2017) Research on Design of Weak Current Measurement System Based on Ⅰ-Ⅴ Convertor. *Proceedings of the* 2017 2*nd International Conference on Materials Science, Machinery and Energy Engineering*, Dalian, 13-14 May 2017, 812-817.

[19] 赵雷, 纪文昕, 齐航天, 等. 石英加速度计电流信号测量系统设计与实现[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(9): 78-80+84.

[20] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[21] 李岩, 宋常青, 侯跃新, 等. 提高微弱电流放大器性能的方法[J]. 核电子学与探测技术, 2007. 27(5): 978-981.

[22] 穿越电流测量的无人区——pA 等级电流测量[J]. 世界电子元器件, 2020(7): 20-25.

[23] 徐迎春, 莫玮, 刘冲, 等. 小电流测量单元校准技术研究[J]. 宇航计测技术, 2012, 32(3): 35-38.

[24] 姜利英, 岳保磊, 梁茂, 周鹏磊, 肖小楠. 一种改进型微弱电流低噪声放大应用电路[J]. 2015(3): 118-122.

[25] Yuan, Z., Yong, Y., Li, X., *et al*. (2011) Experimental Study of fA Level Micro-Current Measurement. 2011 *International Conference on Electric Information and Control Engineering*, Wuhan, 1 January 2011, 3262-3265.

[26] 范立云. 对于仪器仪表抑制干扰的措施及应用研究[J]. 今日自动化, 2020(5): 28-30.